



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. di AGRONOMIA, ANIMALI, ALIMENTI, RISORSE NATURALI E
AMBIENTE

Dip. TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea magistrale in SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**Robot agricolo e trattrice convenzionale: confronto tra
operazioni colturali effettuate durante un ciclo di *Zea
mays***

RELATORE:

Prof. Luigi Sartori

CORRELATORE

Dott. Marco Sozzi

LAUREANDO:

Alessandro Nespolo

Matricola n. 2062833

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice

RIASSUNTO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUZIONE	3
1.1 Robotica ed automazione in agricoltura	3
1.1.1 Robot per il diserbo meccanico, difesa chimica e fertilizzazione	8
1.1.2 Robot per il monitoraggio	9
1.1.3 Robot porta attrezzi	10
1.1.4 Robot per la raccolta e trasporto	10
1.1.5 Vantaggi e svantaggi della robotica in agricoltura	11
1.2 Legislazione e normativa relativa ai robot	18
1.3 Obiettivo del lavoro	20
2 DESCRIZIONE DEL ROBOT IN PROVA	21
2.1 Agrobot "Robotti 150D"	21
3 MATERIALI E METODI	23
3.1 Disegno sperimentale e cantieri di lavoro	23
3.2 Misurazioni	23
3.2.1 Erpicatura	23
3.2.2 Semina	29
3.2.3 Sarchiatura	32
3.2.4 Biomassa in prossimità della raccolta	33
4 RISULTATI E DISCUSSIONE	35
4.1 Risultati	35
4.1.1 Erpicatura	35
4.1.2 Semina	38
4.1.3 Sarchiatura	42
4.1.4 Biomassa in prossimità della raccolta	46
4.2 Discussione	48
5 CONCLUSIONI	55
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	58

Elenco delle figure

1	Schema delle connessioni Robot-macchina operatrice.	6
2	Esempi di agrobot a propulsione elettrica e specializzati. A sinistra "Vitirover" per il diserbo meccanico in colture arboree e a destra "Farmdroid" per la semina e il diserbo meccanico in pieno campo.	8
3	"LaserWeeder" di Carbon Robotics (a sinistra) e prototipo di Eco-robotix (a destra).	9
4	Confronto fra l'incremento in utile in base agli scenari considerati e alla superficie da lavorare.	13
5	Confronto del punto di pareggio per adottare la conduzione dell'azienda con macchine autonome.	13
6	Schema delle connessioni Robot-macchina operatrice.	15
7	Costi operativi in base alla supervisione espressa come percentuale rispetto al totale di ore di lavoro.	16
8	Costi di produzione in base al grado di automatizzazione del sistema produttivo.	18
9	Visione frontale e laterale Robotti 150D.	21
10	Esempio creazione cantiere di lavoro con Webapp Agroitelli	22
11	Schema sperimentale.	23
12	Regressione lineare larghezza-potenza erpicatura.	28
13	Profilometro Leica Disto pro4.	28
14	Robotti 150D e seminatrice Mascar.	31
15	Rilevazione omogeneità di semina.	31
16	Schema punti di rilevamento per l'omogeneità di semina.	32
17	I cantieri di lavoro della sarchiatura: trattore convenzionale (sinistra) e Robotti 150D (destra).	33
18	Schema punti di rilevamento per la biomassa in prossimità della raccolta.	34
19	Campioni di biomassa processati prima dell'inserimento in stufa.	34
20	Grafico profilometria di Robotti.	36
21	Grafico profilometria del trattore.	37
22	Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare (erpicatura).	37
23	Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie (erpicatura).	38
24	Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare (semina).	41
25	Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie (semina).	41
26	Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare a 3km/h (sarchiatura).	45
27	Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare a 5km/h(sarchiatura).	45
28	Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie a 3km/h (sarchiatura).	46
29	Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie a 5km/h (sarchiatura).	46
30	Confronto della produzione media stimata di granella.	47

31	Confronto della produzione media stimata di granella.	48
32	Confronto fra il numero di mezzi tecnologicamente avanzati ed obsoleti necessari a lavorare pari superfici.	49
33	Confronto fra potenze richieste fra la simulazione alle stesse condizioni operative della trattrice (a sinistra) e con le condizioni registrate durante questa prova sperimentale (a destra).	52
34	Confronto fra il numero di ettari a cui è necessario acquistare uno e due robot alle stesse condizioni operative della trattrice (a destra) e con le condizioni registrate durante questa prova sperimentale (a sinistra).	52
35	Trattore porta attrezzi Nexat (sinistra) e Robotti 150D.	54

Elenco delle tabelle

1	ANOVA effettuata sulla profilometria del suolo.	35
2	Analisi tempi di lavoro e dimensionamento del cantiere di lavoro di erpicatura.	36
3	Confronto TE e TAV del cantiere di semina.	40
4	Analisi tempi di lavoro del cantiere di semina.	40
5	Analisi di dimensionamento del cantiere di semina.	40
6	Analisi qualità di semina.	41
7	Analisi t di Student con "α" del 5% (semina).	42
8	Analisi tempi di lavoro, TE e TAV della sarchiatura a 3 e 5 km/h.	43
9	Analisi di dimensionamento del cantiere di lavoro di sarchiatura a 3km/h.	44
10	Analisi di dimensionamento del cantiere di lavoro di sarchiatura a 5km/h (sarchiatura).	44
11	Confronto tra rese medie di biomassa e granella e tra numero di piante alla raccolta con P value.	47

RIASSUNTO

Negli ultimi anni l'agricoltura è chiamata a soddisfare le esigenze nutritive di una popolazione mondiale in costante crescita. L'agricoltura "4.0" ha consentito di automatizzare molte operazioni colturali ottenendo maggiore produttività e razionalizzazione dei fattori produttivi. Questi processi di automazione hanno portato alla comparsa dei primi robot agricoli che operano senza la presenza di un operatore. Essi promettono di aumentare ancora di più la produttività potendo lavorare con precisione per più ore consecutivamente rispetto alle comuni trattrici. In questa tesi dunque, dopo una breve ricerca bibliografica per identificare le principali tipologie di robot agricoli o "agrobot", il quadro normativo (ancora non del tutto definito per questa materia) e i principali vantaggi e svantaggi definiti dalla bibliografia, viene proposto un confronto tra le lavorazioni effettuate da un robot ("Robotti 150D" di Agrobot) e da un cantiere tradizionale durante un ciclo colturale di *Zea mays*. In particolare sono state comparate le lavorazioni di erpicatura, semina e diserbo meccanico (sarchiatura). Per ciascuna di esse è stata fatta l'analisi dei tempi di lavoro per individuare, rendimento dei cantieri di lavoro, capacità utile e l'analisi del dimensionamento degli stessi. Per le operazioni di erpicatura e semina sono state effettuate analisi qualitative, rispettivamente tramite profilometria e rilevamento di fallanze, doppie deposizioni e distanza media da seme a seme. Esse permettono di affermare che entrambi i cantieri svolgono lavorazioni qualitativamente comparabili tra di loro. Le analisi dei tempi di lavoro e di dimensionamento hanno evidenziato che sebbene il robot abbia una capacità di lavoro (ha/h) minore del cantiere tradizionale, la superficie dominabile risulta comparabile se non maggiore grazie alla possibilità di lavorare per più ore al giorno. Questo fattore permette inoltre di necessitare di meno potenza per effettuare le suddette lavorazioni a parità di superficie rispetto al cantiere tradizionale, comportando minori consumi, emissioni e usure. Infine viene proposta una stima del numero di mezzi necessari ad effettuare le suddette lavorazioni in base ad un'ipotetica superficie (1-120ha), basata sui parametri operativi utilizzati durante questa prova sperimentale. Per le lavorazioni di erpicatura e diserbo meccanico risulta che si necessitano di un minor numero di unità autonome rispetto a quelle tradizionali grazie alla possibilità di lavorare per più ore al giorno rispetto alla trattrice. Per la lavorazione di semina questi risultati si invertono a causa della minore velocità operativa dell'agrobot, limitata dalla casa costruttrice.

ABSTRACT

In recent years, agriculture has been called upon to meet the nutritional needs of a constantly growing global population. Agriculture "4.0" has allowed the automation of many farming operations, resulting in increased productivity and rationalization of production factors. These automated processes have led to the emergence of the first agricultural robots that operate without the presence of an operator. They promise to further increase productivity by working with high precision for more consecutive hours compared to conventional tractors. In this thesis, following a brief literature review to identify the main types of agricultural robots or "agrobots," the regulatory framework (still not entirely defined for this matter), and the main advantages and disadvantages defined by the literature, a comparison between the operations carried out by a robot (Agrointelli's Robotti 150D) and a traditional farm during a cycle of *Zea mays* is proposed. In particular, the operations of power harrowing, sowing, and mechanical weeding were compared. For each of these, two types of analysis were conducted: an analysis of the working times to identify the efficiency, the useful capacity and a sizing analysis of the agricultural work site. For plowing and sowing operations, qualitative analyses were performed, respectively through profilometry and the detection of faults, double depositions, and average seed-to-seed distance. They allow us to assert that both systems perform qualitatively comparable operations. The working times and sizing analyses have shown that although the robot has a lower working capacity (ha/h) than the traditional tractors, the dominable area is comparable if not greater due to the ability to work for more hours per day. This factor allows the Robotti tractor to require less power to perform the same operations over the same area compared to the conventional tractors, resulting in lower consumption, emissions, and wear. Finally, an estimate of the number of units needed to perform these operations based on a hypothetical area (1-120ha) is proposed, based on the operational parameters used during this experimental test. For plowing and mechanical weeding operations, a lower number of autonomous units are needed compared to traditional ones, thanks to the possibility of working for more hours per day than a tractor. For the sowing operation, these results are reversed due to the lower operating speed of the agrobot, limited by the manufacturer.

1 INTRODUZIONE

1.1 Robotica ed automazione in agricoltura

L'agricoltura mondiale è chiamata a soddisfare i bisogni di una popolazione in continua crescita, facendo i conti allo stesso tempo con il cambiamento climatico, crisi geo-politiche e la sempre maggiore di carenza di impiegati nel settore (-2.1% in Italia nel 2022¹). Restrungendo al settore primario europeo, a questi fattori limitanti si aggiungono anche le sempre più stringenti direttive europee. L'UE infatti ha posto, tramite il **Green deal**[5] (o legge europea sul clima approvata nell'estate del 2021), obiettivi ben precisi per ridurre del 55% le emissioni di inquinanti in atmosfera entro il 2030 e per raggiungere la neutralità climatica nel 2050. L'agricoltura, essendo responsabile del 27% della produzione di molecole inquinanti, è chiamata a sostenere cambiamenti sostanziali nella sua gestione e conduzione. Di conseguenza gli input devono essere razionalizzati il più possibile, preferendo allo stesso tempo soluzioni di difesa integrata chimica-biologica o totalmente biologica. In termini numerici, parlamento e commissione si aspettano una riduzione del 50% dell'utilizzo di pesticidi, un aumento della conduzione dei terreni a biologico fino ad un 30% rispetto alla totalità delle terre coltivate, ottenere un 10% delle terre agricole ad elementi di biodiversità e una riduzione del 50% della perdita di nutrienti dal suolo (secondo i calcoli dovrebbe portare ad un risparmio del 20% di fertilizzanti). La meccanizzazione agricola, fondamentale ormai da decenni del settore primario, è quindi chiamata a fornire un notevole supporto per riuscire a soddisfare gli obiettivi appena citati fornendo un aiuto sia decisionale che operativo. Un grosso limite che si pone alla razionalizzazione dei fattori produttivi è la grossa variabilità tipica di questo settore. In agricoltura può essere definita come: tendenza di uno stesso fenomeno a presentarsi diversamente in base alla zona della sua misurazione nell'appezzamento. Essa si declina in più varianti in base alla componente dell'agroecosistema considerata:

- Spaziale e temporale: In generale, le condizioni di un appezzamento e i suoi parametri biologici, chimici e fisici non sono mai stabili ma in continuo mutamento; sia con il passare del tempo, sia se misurati in diversi punti dell'appezzamento stesso.
- Colturale: ogni coltura ha caratteristiche biologiche e morfologiche differenti dalle altre. Ciò determina diverse necessità nutritive, pedologiche e di coltivazione (sesto di impianto, investimento alla semina, necessità di strutture ausiliari).

¹Fonte: ISTAT, andamento dell'economia agricola.

- Climatica: il clima è il principale fattore che incide sul tipo di colture possibilmente coltivabili in una determinata zona ma anche sull'esito stesso dell'annata agraria (possibili eventi atmosferici estremi, siccità, alluvioni).
- Gestionale: ogni agricoltore adotta metodi di gestione dei suoi appezzamenti (lavorazioni, dosi di input, varietà scelte) differenti; ciò può far differenziare le lavorazioni richieste.

Un così alto grado di variabilità ha riscontri pratici notevoli: applicando per esempio la stessa dose di concime ad un intero appezzamento, la risposta produttiva varierà in base al grado di tessitura e fertilità. Inoltre verrà applicato troppo concime in zone poco fertili, risultando nella perdita dei nutrienti che il terreno non è in grado di assorbire e troppo poco concime in zone che invece potrebbero potenzialmente assorbirne di più. La resa finale sarà quindi minore rispetto alla massima ottenibile da quell'appezzamento, con sprechi economici dovuti alla perdita dei nutrienti. Fino a qualche decennio fa questi problemi venivano limitati dall'esperienza dell'agricoltore che conosceva i suoi appezzamenti e sapeva come gestirli nel migliore dei modi possibile. La gestione della variabilità è radicalmente cambiata con l'introduzione dell'**agricoltura di precisione (PA)**, definita come²: "L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione che raccoglie, elabora e analizza dati temporali, spaziali e individuali e li combina con altre informazioni per supportare le decisioni di gestione in base alla variabilità stimata per migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola.". La PA viene resa possibile essenzialmente dall'utilizzo contestuale di tre tecnologie:

- Sensori: prossimali o remoti, questi strumenti riescono ad acquisire informazioni in base all'energia elettromagnetica riflessa dalla vegetazione. Vengono utilizzati per l'acquisizione di diversi parametri o indici riguardanti sia lo stato vegetativo della coltura in atto, sia il terreno, sia il livello produttivo. I sensori vengono classificati [17] in base al tipo di sensore e in base alla piattaforma in cui vengono montati. Li troviamo infatti installati sia sulle macchine operatrici (come i sensori di resa nelle macchine per la raccolta), sia in veicoli UAV (droni) per la rilevazione in più ampia scala di indici di vegetazione (NDVI, NDRE per lo stress idrico per esempio), sia direttamente nei satelliti. Anche in questo caso per la rilevazione di indici di vegetazione, acquisiti però con risoluzione minore e spesso troppo grossolana per applicazioni precise in PA. I diversi tipi di sensori invece differiscono in base alla risoluzione spaziale, temporale e di spettrometria che riescono ad offrire.

²Fonte: IPISA, International Society of Precision Agriculture (www.ispag.org).

- Mappe di prescrizione e DSS (Decision Support System): le prime sono mappe tematiche che raccolgono e geolocalizzano i dati rilevati con i sensori; sono utili per visualizzare la variabilità descritta dai dati raccolti in precedenza. I dati contenuti nelle mappe vengono poi caricati nelle macchine operatrici per la gestione a rateo variabile. I DSS invece sono software complessi che in base alle informazioni raccolte forniscono come output vari "consigli agronomici" utili all'agricoltore nella gestione dell'azienda. DSS ormai diffusi sono per esempio quelli utili a determinare la soglia di intervento per i trattamenti fitosanitari in base a parametri come la piovosità e l'umidità. Possono anche essere utilizzati per unire le informazioni riguardanti lo stato idrico della coltura e le previsioni meteo per programmare gli interventi di irrigazione.
- Macchine operatrici per la gestione variabile (GNSS e macchine operatrici a rateo variabile): queste macchine riescono a variare, durante la lavorazione, la dose di input o molecola per la difesa erogata (semi, concime, erbicidi, fungicidi) in base alle informazioni fornite dalle mappe di prescrizione. Spesso questi attrezzi sono abbinati a meccanismi di guida autonoma montati sulle trattrici; essi utilizzano il sistema di posizionamento globale (GPS) per creare, durante la lavorazione, passate parallele tra di loro senza zone di sovrapposizione o di mancato trattamento tra una passata e l'altra. In questo modo le macchine operatrici distribuiscono solamente la quantità di input strettamente necessaria al terreno. I sistemi GNSS si differenziano in base al grado di errore tra una passata e l'altra: la tecnologia più precisa è quella RTK (Real Time Kinematik), agisce direttamente sul sistema idraulico di sterzo e ha un errore massimo di 1-3 cm; abbiamo poi sistemi semi-automatici che agiscono sul volante e apportano un errore di 5-10cm e infine sistemi a "barre di guida" che non correggono la guida ma indicano all'operatore in che direzione correggere la passata in tempo reale.
- ISO11783: comunemente chiamato "ISOBUS", questo standard ISO definisce un sistema di inter-connettività plug and play tra macchina operatrice e trattore. Esso permette di raccogliere le informazioni registrate dai sensori posti sulla macchina operatrice, visualizzare tali dati in un monitor posto nella trattrice (Virtual Terminal) e sempre da quel monitor cambiare, qualora sia possibile, i parametri di lavoro dell'attrezzo senza dover scendere dal trattore e fermare la lavorazione. Può essere anche installato un comando ausiliario (Aux-N) che permette di memorizzare su ciascun suo taso delle azioni da far svolgere alla macchina operatrice senza quindi passare dal Virtual Terminal. Questo sistema (schematizzato in figura 1) consente anche

di ottenere altre funzionalità come la memorizzazione di sequenze operative ripetitive, utili quando è necessario effettuare una svolta a fine campo al fine, per esempio, per far fermare gli organi di lavoro e alzare i bracci di sollevamento. La connettività trattore - attrezzo di lavoro viene anche sfruttata per far compiere delle variazioni ai parametri di lavoro in base alla posizione GPS, attuando di fatto la lavorazione a rateo variabile descritta appena sopra.

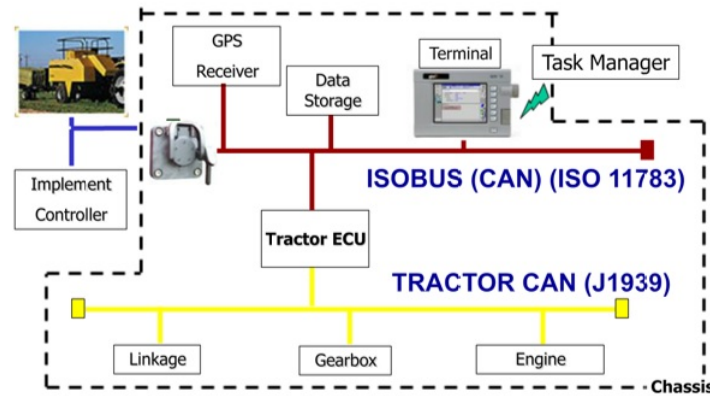


Figura 1: Schema delle connessioni Robot-macchina operatrice.

Queste tecnologie hanno portato alla nascita dell'**agricoltura 4.0** in cui i dati raccolti dai sensori vengono stoccati in cloud creando un archivio digitale. Si possono ottenere quindi serie storiche tramite le quali è possibile capire con certezza matematica se la gestione agronomica dei terreni è efficace, fornendo notevole supporto agli agricoltori. È ormai comprovato che gli agricoltori hanno raggiunto e stanno ottenendo maggiori livelli di benessere, riuscendo a razionalizzare costi e massimizzare i ricavi derivanti dall'attività agricola. Allo stesso tempo gli strumenti di semi-automazione della guida riducono notevolmente lo stress a cui l'operatore è sottoposto, diminuendo di molto l'incidenza di errori e permettendo allo stesso tempo di lavorare per più ore giornaliere grazie al mantenimento della precisione anche con la scarsa visibilità delle ore notturne.

Grazie al livello tecnologico raggiunto le operazioni svolte dall'operatore possono essere ridotte ai minimi termini, organizzando cantieri di lavoro anche complessi in cui le macchine motrici e operatrici sono interconnesse tra di loro. Viste le potenzialità di queste innovazioni, sempre più aziende di costruttori hanno incominciato a implementarle in sistemi autonomi, introducendo la robotica anche nel mondo agricolo, togliendo o riducendo ai minimi termini l'elemento operatore dall'equazione. La bibliografia ha individuato l'impiego della robotica nei seguenti comparti agricoli [19]:

- Trattori e macchine per la raccolta autonomi.
- Macchine per l'applicazione di precisione di prodotti fitosanitari e fertilizzanti e per il diserbo meccanico.
- Sistemi di irrigazione autonomi.
- Sistemi autonomi di macellazione e di processazione e packaging del cibo.
- Nella zootecnica con sistemi di alimentazione e mungitura robotici e robot per la tosatura.
- Droni per l'ispezione automatizzata di altri sistemi agricoli (sistemi di irrigazione e recinzioni).
- Robot per la raccolta automatizzata della frutta.
- Treni e camion autonomi per il trasporto di prodotti agricoli.
- Robot per la gestione del bestiame al pascolo.

Tra le applicazioni sopra elencate, si sta assistendo ad una rapida espansione dei robot destinati al pieno campo. Pur non essendoci ancora una definizione univoca, i robot agricoli o "agrobot" possono essere definiti come [9]: "dispositivo meccanico mobile, autonomo, decisionale che svolge attività di produzione agricola (preparazione del terreno, semina, trapianto, diserbo, controllo parassiti e raccolta) sotto la supervisione umana, ma senza lavoro umano diretto". In queste macchine quindi, a differenza delle trattrici comuni, le operazioni colturali e le conseguenti decisioni operative, vengono svolte in maniera completamente autonoma, esonerando l'agricoltore dal processo decisionale durante la lavorazione stessa; ad esso rimangono solamente da effettuare le operazioni di programmazione del lavoro, trasporto in campo del robot e rifornimento (sia di carburante che di fattori produttivi durante le lavorazioni che ne richiedono). Visti i possibili sviluppi positivi, le aziende produttrici di trattrici leader del settore (John Deere, CNH, Kubota), hanno sfruttato la presenza nel loro listino di modelli top di gamma con sensoristica avanzata e vari sistemi di automazione (guida, memorie di fine campo) per produrre prototipi senza conducente con lo scopo di dimostrare il loro livello tecnologico. Queste aziende tuttavia, procedono molto caute nell'introduzione di questi veicoli nel mercato, a causa delle grandi dimensioni dei loro prototipi e sono timorose di possibili incidenti o cavilli legali che possano minare la loro reputazione storica [1]. Per questo motivo, soprattutto nei primi anni di presenza nel mercato, le aziende che oggi producono agrobot hanno optato per la realizzazione di macchine autonome di più piccole dimensioni e specializzati in una o poche operazioni colturali (Figura



Figura 2: Esempi di agrobot a propulsione elettrica e specializzati. A sinistra "Vitirover" per il diserbo meccanico in colture arboree e a destra "Farmdroid" per la semina e il diserbo meccanico in pieno campo.

2). In questo modo possono ridurre notevolmente i rischi relativi alla sicurezza, abbattere i costi e, utilizzando sistemi di propulsione elettrici, sfruttare la minore impronta ecologica per rendere più appetibile il prodotto. L'elettrico rappresenta infatti il sistema di alimentazione utilizzato dal 78% dei robot presenti nel mercato; seguito dal diesel (14%) e ibrido (8%) [18].

Il mercato della robotica agricola è quindi per la maggior parte composto da start-up o da piccole aziende nate ad-hoc che producono piccoli robot, con qualche eccezione rappresentata da produttori di macchine autonome, di più grandi dimensioni, porta attrezzi. È un settore in espansione, con un mercato che si ipotizza possa valere 25 milioni di USD nel 2025, spinto principalmente dagli stati dell'America del nord, Asia ed Europa [1]. Ecco quindi le principali tipologie di robot agricoli, in ordine decrescente di presenza nel settore agricolo [18][12].

1.1.1 Robot per il diserbo meccanico, difesa chimica e fertilizzazione

Questa categoria è senza dubbio quella più rappresentativa degli agrobot; si tratta per lo più di sistemi specializzati e utilizzati sia per colture arboree (frutteti, vigneto), sia per il pieno campo (seminativi). Nel primo caso svolgono le operazioni di trattamento fitosanitario o di diserbo meccanico interfilare. Nel secondo caso, spesso alle comuni operazioni di diserbo meccanico (sarchiatura) o chimico effettuato con botte e barra di distribuzione, vengono abbinati sistemi di riconoscimento delle infestanti. In questo modo il robot riesce ad agire in maniera localizzata solamente dove è presente la malerba, ottenendo quindi una notevole razionalizzazione dei diserbanti. A questo scopo i sensori più utilizzati sono telecamere RGB e sensori laser che riescono ad attuare "l'image-recognition": una tecnologia utilizzata per convertire le immagini scattate su un qualsiasi soggetto in dati digitali che vengono poi analizzati. In agronomia è possibile quindi formulare algoritmi specifici "allenati" a riconoscere le malerbe; essi poi invieranno l'informazione all'organo adibito alla rimozione che si attiverà per svolgere la sua funzione. Per quanto riguarda

il diserbo meccanico inoltre, si sono sviluppate anche soluzioni innovative dove l'eliminazione dell'infestante non viene operata più da organi discissori di tipo tradizionale ma da bracci robotici o da raggi laser (Figura 3) che riescono a rimuovere singola malerba per singola malerba. Oltre alle tipologie di robot comuni su ruote, ci sono casi in via di sviluppo di UAV, ovvero veicoli aerei autonomi che operano in volo, bypassando gli ostacoli a terra passandoci sopra quindi. Anch'essi possono essere dotati di sistemi per il riconoscimento delle malerbe o sistemi di monitoraggio per abbinare l'eliminazione delle infestanti all'acquisizione di informazioni sulla qualità della lavorazione. Incominciano ad essere sviluppati anche i primi prototipi per la potatura e il diradamento in vigneto; i tralci da potare vengono scelti da due algoritmi denominati "Support Vector Machine (SVM)" e "Rapidly Exploring Random Tree" (RRT) (entrambi algoritmi di machine learning). Essi codificano il segnale ad un braccio robotico dotato di una lama che taglia i tralci codificati come "da potare". Le stesse tecnologie di remote sensing possono essere utilizzate anche per le operazioni di fertilizzazione. Specifici sensori, che leggono specifiche lunghezze d'onda di luce riflessa dalla vegetazione, sono utilizzati per determinare lo stato nutritivo della coltura e in base ad esso variare la dose di fertilizzante erogata.



Figura 3: "LaserWeeder" di Carbon Robotics (a sinistra) e prototipo di Ecorobotix (a destra).

1.1.2 Robot per il monitoraggio

Dotati di sensoristica atta alla rilevazione di dati riguardanti il terreno e/o diversi parametri della coltura in atto, possono essere utilizzati per la rilevazione di varie tipologie di dati, geolocalizzando i punti di rilevamento e automatizzandone la raccolta. Un esempio in produzione è il robot "TerraSentia" della statunitense EarthSense Inc [11]. Anche in questo caso si possono avere sia robot che operano a terra che UAV. In questo caso sono proprio gli UAV quelli con maggiore successo: essi derivano da normali droni fotografici a cui viene apposta una o più sensori

e/o telecamere RGB per scansionare dall'alto il terreno e fornire diverse informazioni quali stato nutrizionali e idrico, presenza di malattie, indici di vegetazione e di stima della resa. Il grosso vantaggio di questo tipo di robot è che grazie ai moderni sensori riescono a coprire porzioni di superficie nettamente maggiori in una passata rispetto ai robot a terra. Inoltre il percorso che questi veicoli autonomi devono percorrere per scansionare tutto l'appezzamento viene calcolato da un software ed eseguito in automatico, dal decollo all'atterraggio ad operazione conclusa. Ovviamente anche in questa categoria di robot sono previsti sistemi di prevenzione degli incidenti come radar e sensori. Le immagini raccolte durante la scansione vengono solitamente processate in un secondo momento con appositi software.

1.1.3 Robot porta attrezzi

Si tratta di robot dotati di un tradizionale attacco a "tre punti" a cui possono essere collegate le convenzionali macchine operatrici. Sono generalmente più grandi rispetto alle categorie di cui sopra e più spesso, a causa della maggiore potenza richiesta, optano per l'utilizzo di motori endotermici. Sono però le macchine autonomi più versatili e quelli maggiormente applicabili in aziende estese. I design utilizzati per questo tipo di agrobot possono essere essenzialmente di tre tipologie:

- Robot con attacco a tre punti posto posteriormente alla macchina.
- Robot con attacco a tre punti posto all'interno dell'ingombro del telaio.
- Robot specializzati a compiere una sola lavorazione.

Anch'essi, come i robot per il diserbo meccanico, utilizzano sistemi di guida GPS-RTK uniti a sistemi di rilevazione degli ostacoli di vario tipo (sensori remoti o barre sensorizzate) per effettuare le lavorazioni con precisione evitando scontri con ostacoli. Una piccola categoria a parte riguarda le operazioni di semina, la maggior parte dei robot prodotti per questo scopo sono di piccola dimensione e specializzati. In questa categoria, applicazioni interessanti si riscontrano anche in orticoltura oltre che in pieno campo; con soluzioni che riescono a mantenere alta la produttività (fino a 2000 piante/ora trapiantate) pur contenendo costi e dimensioni.

1.1.4 Robot per la raccolta e trasporto

Si tratta di robot utilizzati per l'automatizzazione delle fasi di raccolta, pensati soprattutto per la frutticoltura. Questa categoria però è quella meno sviluppata al momento in quanto i processi da automatizzare sono differenti e complessi. Si

tratta infatti di dover "insegnare" al robot a spostarsi autonomamente da albero ad albero (se non si tratta di una coltura a filari), da filare a filare e a riconoscere i frutti dalla vegetazione o i frutti al giusto grado di maturazione se si tratta di specie con maturazione scalare (pomodoro). Se, come già visto nei paragrafi precedenti, le attività di riconoscimento si sono evolute notevolmente negli ultimi anni, lo stesso non si può dire per le parti di trasferimento da albero ad albero negli impianti non a filare. A ciò si aggiunge l'elevato grado di diversità tra i frutti presenti in commercio (fattore che rende difficile produrre macchine e/o algoritmi in grado di raccogliere più tipi di frutta) e il loro posizionamento che talvolta rende necessario spostare della vegetazione per essere raggiunti. Per questo motivo i prototipi in fase di studio sono tutte macchine autonome specializzate in un solo tipo di frutto. Prototipi in fase avanzata di collaudo sono per esempio il "Berry 5" dell'americana Harvest CROO Robotics per la raccolta delle fragole, che si propone di rendere come 25 - 30 operatori, con un tempo medio di raccolta per frutto di 8 secondi e una velocità operativa di 1.6 km/h.

1.1.5 Vantaggi e svantaggi della robotica in agricoltura

I vantaggi apportati dagli agrobot sono molteplici: uniscono la rilevazione, stoccaggio e utilizzo dei dati dell'agricoltura 4.0, ad altri aspetti caratteristici. Il primo di essi è l'utilizzo della tecnica del traffico controllato: si tratta di una tecnica che prevede l'utilizzo, durante tutte le lavorazioni di un ciclo produttivo, delle stesse carreggiate. In questo modo viene calpestata sempre la stessa porzione di terreno, consentendo di diminuire l'energia utilizzata per le lavorazioni (fino a -20%), di conseguenza le emissioni di inquinanti in atmosfera [6] ed il compattamento soprattutto nei primi strati di terreno (lo strato maggiormente interessato da molte coltivazioni a pieno campo) [15]. Altro punto a favore è rappresentato dalla predisposizione all'utilizzo di sistemi a propulsione elettrici: l'assenza della cabina per il conducente rende facilitata l'installazione di pannelli solari e pacchi batterie per alimentare sistemi di locomozione elettrici. Essi necessitano inoltre di minore manutenzione rispetto ai comuni motori endotermici, fattore che rende sicuramente più tempestivo il tempo di recupero dell'investimento iniziale (tipicamente più oneroso rispetto alle corrispondenti macchine tradizionali). L'elettrico aiuta anche nella precisione delle lavorazioni: gli attuatori elettrici infatti, aumentano la precisione nelle lavorazioni rispetto ai normali sistemi idraulici o a molla presenti per esempio nelle macchine per il diserbo interfilare dei vigneti. A questo proposito, uno studio [7] ha comparato il Life Cycle Assessment (o LCA) di una trattoria autonoma a batteria e quella di una trattoria convenzionale. I punteggi di confronto calcolati sono tutti a favore del trattore elettrico, in particolare il suo ciclo di vita è significativamente meno impattante rispetto al trattore convenzionale; con que-

st'ultimo che ha ottenuto un Global Warming Potential di 239 kg CO₂ eq. per ettaro per anno al fronte di 102 kg CO₂ eq. del trattore autonomo. Quest'ultimo è risultato meno impattante anche nei punteggi di impatto sull'ecosistema (-74%), scarsità dei materiali di costruzione (-67%) e salute umana (-74%). In particolare la fase di vita più impattante del mezzo autonomo è risultata la costruzione delle batterie (coefficiente GTG³ che varia nelle diverse fasi produttive dal 42% al 83%) e delle stazioni di ricarica, componenti che richiedono molti processi costruttivi differenti e molti metalli. Altro aspetto da non sottovalutare riguarda la possibilità di ottenere una superficie dominabile per lavorazione (derivata dalla moltiplicazione della capacità utile di lavoro⁴ per le ore a disposizione per effettuare tale operazione agronomica.) maggiore rispetto alle comuni trattrici. Questo perchè l'utilizzo di sistemi di guida GPS uniti a quelli di rilevazione degli ostacoli permettono ai robot di lavorare con precisione anche durante le ore notturne o con scarsa visibilità, aumentando così la superficie dominabile rispetto alle comuni trattrici, limitata dagli orari lavorativi conducente. Lavorare per più ore consecutivamente senza la necessità di un conducente implica un'importante riduzione dei costi, che unita alla maggiore razionalizzazione dei fattori produttivi, aumenta l'utile netto derivante dalle coltivazioni. A livello teorico questo aspetto è stato analizzato da uno studio [16] in cui si confrontano i rendimenti di una ipotetica azienda condotta in maniera tradizionale e con trattori autonomi, considerando varie dimensioni, prezzi dei cereali e benefici apportati dalla tecnologia più recente. Come già accennato i vantaggi a livello quantitativo derivano essenzialmente dal fatto che si compiano le lavorazioni con trattrici autonome, dotate di GPS-RTK, peso ridotto e di macchine operative ottimizzate per l'agricoltura di precisione. In questo modo si riescono a ridurre gli sprechi di input (evitando sovrapposizioni o zone di mancato trattamento) e il compattamento, aumentando la resa finale della coltura. Questi aspetti di risparmio di fertilizzanti, prodotti fitosanitari e carburanti risulterebbero anche in una gestione più sostenibile dell'azienda. Vengono dunque proposti diversi scenari di studio: quello base in cui si confrontano solamente i risultati dei due tipi di lavorazioni ("base scenario"); quello in cui si considerano anche la maggiore resa (ipotizzata ad un +7%), quello in cui sono presi in considerazione minori costi di input della tesi con robot autonomi (ipotizzato un risparmio economico del 10%), diversi prezzi di vendita dei cereali e tutti e quattro gli scenari combinati. Per tutte le combinazioni si è notato un incremento dell'utile netto dell'azienda, valore che aumenta all'aumentare dei vantaggi considerati (figura 4). In particolare si stimano riduzioni del 28% nei costi di mantenimento e del 34%

³GTG: indice "gate to gate" e indica il peso sull'impatto ambientale di un singolo processo produttivo di un determinato oggetto.

⁴Capacità utile: capacità, espressa in ettari all'ora, di effettuare una determinata lavorazione agronomica

costi operativi delle macchine autonome.

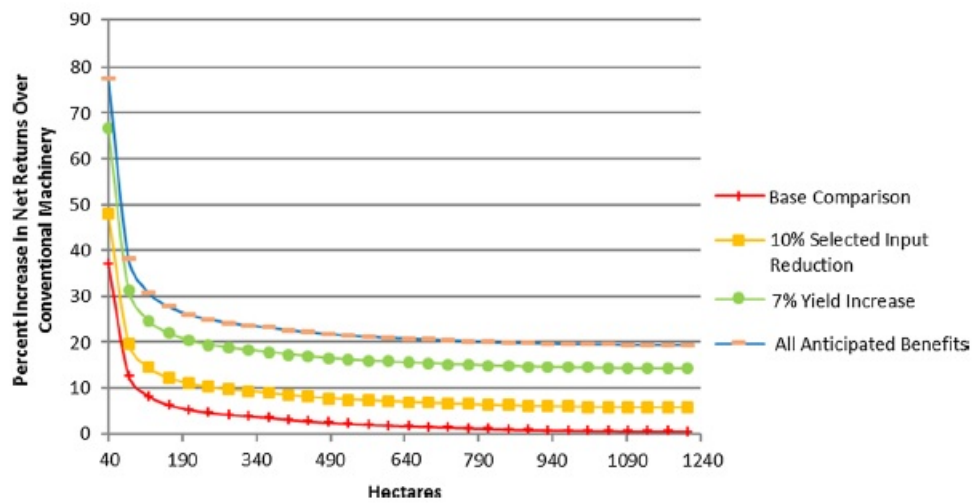


Figura 4: Confronto fra l'incremento in utile in base agli scenari considerati e alla superficie da lavorare.

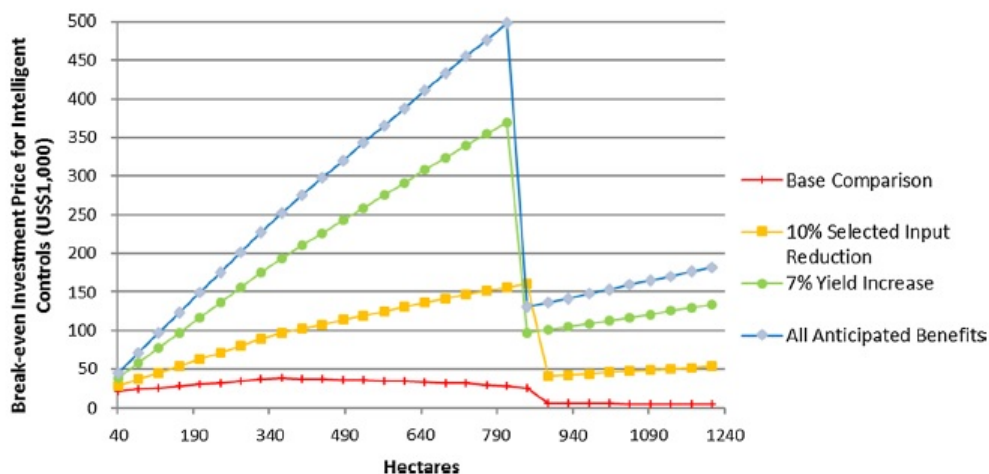


Figura 5: Confronto del punto di pareggio per adottare la conduzione dell'azienda con macchine autonome.

Considerati questi aumenti nell'utile netto, sono anche analizzate le variazioni di questi ultimi in base alla dimensione dell'azienda agraria. Sorprendentemente analizzando le varie simulazioni, i vantaggi maggiori (quindi i maggiori aumenti di ricavi rispetto all'utilizzo di cantieri tradizionali) si verificherebbero nelle aziende più piccole; presumibilmente perchè riuscirebbero meglio a sfruttare le macchine autonome di più modeste dimensioni compiendo economia di scala, distribuendo quindi in maniera ottimale i costi tra le varie operazioni agronomiche. Le aziende "tradizionali" più piccole avrebbero più difficoltà ad operare questo procedimento

in quanto il dimensionamento delle trattrici risulterebbe più difficoltoso, comportando l'acquisto di mezzi con più potenza (e quindi più costosi) rispetto a quella che realmente sarebbe richiesta per lavorare gli appezzamenti di sua pertinenza; risultando quindi in maggiori costi ad ettaro rispetto all'ipotesi degli agrobot. Tutto questo risulterebbe in un punto di pareggio per l'acquisto delle macchine autonome che cresce all'aumentare delle dimensioni delle aziende (Figura 5).

Il lavoro effettuato può essere non solo aumentato in termini quantitativi ma anche qualitativi. Anche i robot agricoli infatti, possono essere previsti di connettori ISOBUS per inter-comunicare con le macchine operatrici 4.0. Questa accoppiata è stata già testata in un caso sperimentale [13]. In questa prova, effettuata con due tipi di Robot ("Robotti" di Agrobot e "CEOL" di AgreenCulture) e due tipi di macchine operatrici (atomizzatore e una macchina per il diserbo meccanico), si è voluto implementare la connettività ISOBUS per collegare non solo le macchine operatrici tra di loro ma anche un sistema definito "perception unit". Questa unità è costituita da un software che, utilizzando le registrazioni, realizzate da due telecamere RGB, di specifiche lunghezze d'onda di luce riflessa dalla vegetazione, è in grado di valutare lo stato della lavorazione e/o valutare lo stato vegetativo della coltura in atto (nutrienti e/o presenza di malattie). Questi dati vengono poi processati con il metodo del "deep learning": gli algoritmi vengono "allenati" a riconoscere i dati ricercati fornendo manualmente delle informazioni al software per restituirle al software stesso che le memorizza. Nel caso dell'atomizzatore i dati presenti in una mappa di prescrizione precedentemente caricata, vengono comparati e aggiornati con quelli acquisiti in tempo reale per poi essere inviati alla ECU dell'atomizzatore che applicherà la dose indicata dal software stesso. Nel caso della macchina operatrice per il diserbo meccanico, le telecamere vengono utilizzate per "guardare" la lavorazione, prima e dopo il passaggio dei robot: qualora siano presenti anomalie, esse vengono registrate e inviate al software che emette un codice di allarme. Le informazioni sulla qualità vengono poi memorizzate (schematizzato in figura 6). In questa prova sperimentale viene messo in evidenza come i robot possano unire, tramite l'applicazione dello standard ISO 11783, due operazioni che con le tecnologie odierne spesso vengono svolte in due momenti separati: il monitoraggio e la lavorazione stessa.

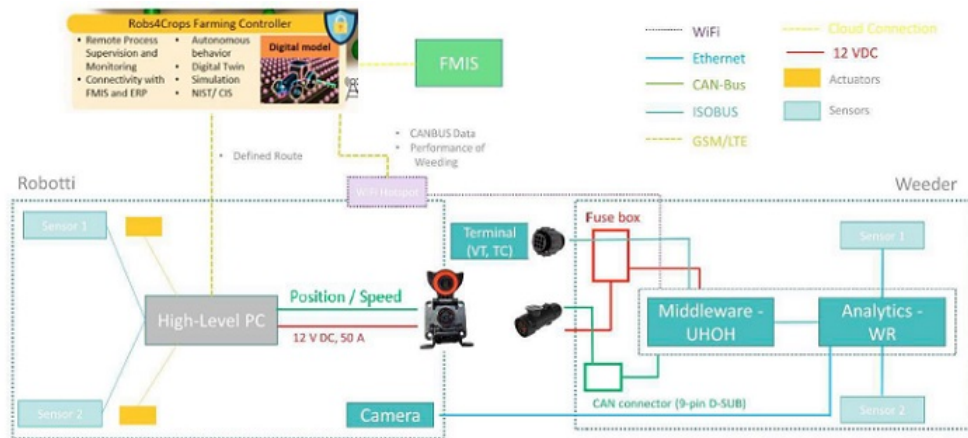


Figura 6: Schema delle connessioni Robot-macchina operatrice.

Come qualsiasi tecnologia di recentissima introduzione, anche la robotica in agricoltura incontra alcuni ostacoli alla sua introduzione su larga scala. Questa materia deve tenere conto del principio generale secondo cui, per essere impiegata efficacemente, deve soddisfare almeno uno dei seguenti requisiti [3]:

- "Il costo di utilizzazione del robot è inferiore al costo di qualsiasi altro metodo convenzionale".
- "L'uso dei robot consente di aumentare la capacità di produzione agricola, profitto e sopravvivenza sotto condizioni competitive di mercato."
- "L'uso dei robot migliora la qualità e l'uniformità dei prodotti."
- "L'uso dei robot minimizza la variabilità e l'incertezza nella crescita e nei processi di produzione dei prodotti agricoli."
- "L'uso dei robot consente di migliorare ed aiutare l'agricoltore durante i processi decisionali e gli permettono di migliorare la qualità delle produzioni e dei processi produttivi."
- "Il robot svolge attività definite rischiose o che l'uomo non può affrontare manualmente."

Tenuto conto di questo principio, del fatto che l'inserimento della tecnologia necessaria a produrre veicoli del tutto autonomi comporta onerosi costi di produzione e del basso livello remunerativo degli agricoltori, è facile dedurre che il più grosso ostacolo all'introduzione degli agrobot derivi dal loro elevato prezzo di acquisto. Risulta difficile pensare che le aziende agricole, se non quelle più estese e innovative, riescano ad ottenere il capitale necessario all'acquisto di macchine autonome senza grosse sovvenzioni da parte di enti pubblici. Un altro ostacolo, non affatto

secondario, è rappresentato dall'ambiente in cui operano gli agrobot [19]. La campagna, soprattutto quella italiana, a differenza degli stabilimenti industriali dove la robotica è ormai diffusa, è molto più complessa e con parametri ambientali in repentina evoluzione. Ciò rende necessario adattare tali contesti ai robot per rendere le condizioni operative più omogenee. Ciò però comporta dei costi notevoli, il che svantaggia notevolmente le piccole o medie aziende (la maggioranza nel territorio italiano), rendendo la tecnologia ancora meno accessibile. Un altro fattore è sicuramente rappresentato dalla scarsa presenza di legislazione a tema (affrontata nel paragrafo successivo) [8]. La robotica agricola è ancora una zona franca della legislazione e la scelta del design costruttivo è ancora del tutto a discapito dell'azienda costruttrice e ciò limita molto l'espansione di questo nuovo settore. È sicuramente necessario quindi, stabilire i limiti legislativi da far rispettare ai costruttori di robot per incentivarne la costruzione. Per esempio, stabilire con chiarezza la quantità di supervisione necessaria che questi agrobot dovranno avere una volta operativi in campo e quindi le ore di lavoro che potenzialmente andranno adibite a questa funzione, potrebbe incidere molto sui costi associati all'utilizzo dei robot, tanto che potrebbero anche surclassare i costi di esercizio di una trattrice convenzionale nel caso di aziende di piccole dimensioni, come mostrato in Figura 7.

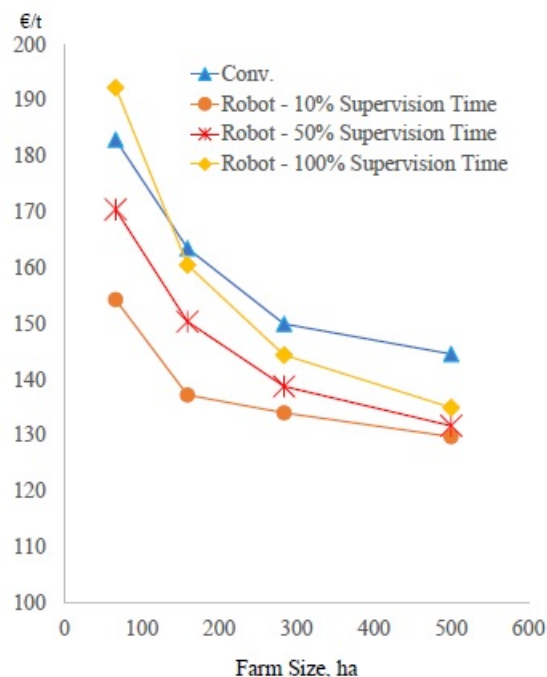


Figura 7: Costi operativi in base alla supervisione espressa come percentuale rispetto al totale di ore di lavoro.

Infine, un altro limite è rappresentato dallo scarso trasferimento tecnologico dai

reparti innovativi verso gli impiegati in agricoltura, che vengono troppo poco messi al corrente di queste nuove innovazioni. In un'Europa dove la maggior parte delle aziende è di piccole dimensioni e gestita da proprietari over 65, un sondaggio [20] dimostra di come il 61% degli agricoltori intervistati abbia difficoltà a reperire informazioni riguardo questo tema, nonostante essi dimostrino interesse nei vantaggi della robotica. Per esempio il 64% degli intervistati riporta difficoltà nel reperire lavoratori. Essi otterrebbero quindi notevole vantaggio dalla plausibile riduzione di addetti necessari a parità di superficie ottenibile con la robotica.

Considerati questi aspetti positivi e negativi che possono sicuramente influenzare la futura introduzione su una più ampia scala della robotica, un solo fondamentale aspetto incide più di tutti quelli elencati sopra: la **riduzione dei costi di produzione** ottenuta grazie all'automazione. In agricoltura la resa finale di una coltura è in funzione di quattro elementi [10]: la massima produzione potenziale (in assenza quindi di fattori limitanti); fattori di variabilità (clima per esempio); il capitale investito e la gestione di questo capitale. L'implementazione della robotica può agire sia nel rendere più efficiente il capitale investito (per esempio riducendo i costi di produzione razionalizzando gli input con applicazioni a rateo variabile) ma anche nell'aiutare l'agricoltore, attraverso operazioni di monitoraggio e sistemi DSS, a prendere decisioni e quindi a gestire tale capitale. Queste agevolazioni però non sono ottenute agli stessi costi: il costo per implementare la robotica è sicuramente minore per operazioni abitudinarie che non richiedono processi decisionali e va via via crescendo man mano che le operazioni da automatizzare richiedono un maggiore livello decisionale. Si presuppone quindi che per queste mansioni (raccolta di prodotti a maturazione scalare per esempio) si utilizzi ancora la manodopera tradizionale che ha un costo minore. Nei sistemi agricoli quindi, il maggiore grado di automazione non corrisponde al minore costo produttivo (Figura 8). All'interno di un sistema produttivo è quindi fondamentale trovare il giusto grado di convivenza tra la tecnologia automatizzata e tradizionale per riuscire ad ottenere la produzione con i costi minori. La percentuale di automazione a cui si ottiene questo compromesso varia in base al tipo di filiera considerata e ancora non è stata definita, visto il basso tasso di utilizzo della robotica soprattutto nelle fasi prima della trasformazione industriale. Sicuramente nelle produzioni di qualità che richiedono molti interventi e supervisioni da parte dell'uomo, o in ambienti in cui la robotica è di difficile introduzione a causa della loro morfologia (viticoltura eroica), le operazioni colturali verranno effettuate dall'uomo ancora per molto. Mentre, in filiere altamente automatizzabili e in contesti meno variabili (ampi spazi pianeggianti), l'automazione in campo sicuramente troverà un ampio spazio anche nell'immediato futuro. In linea generale, la bibliografia analizzata [10] ipotizza un tasso di convivenza delle tue tecnologie dell'80% per la robotica e

20% per la manodopera tradizionale.

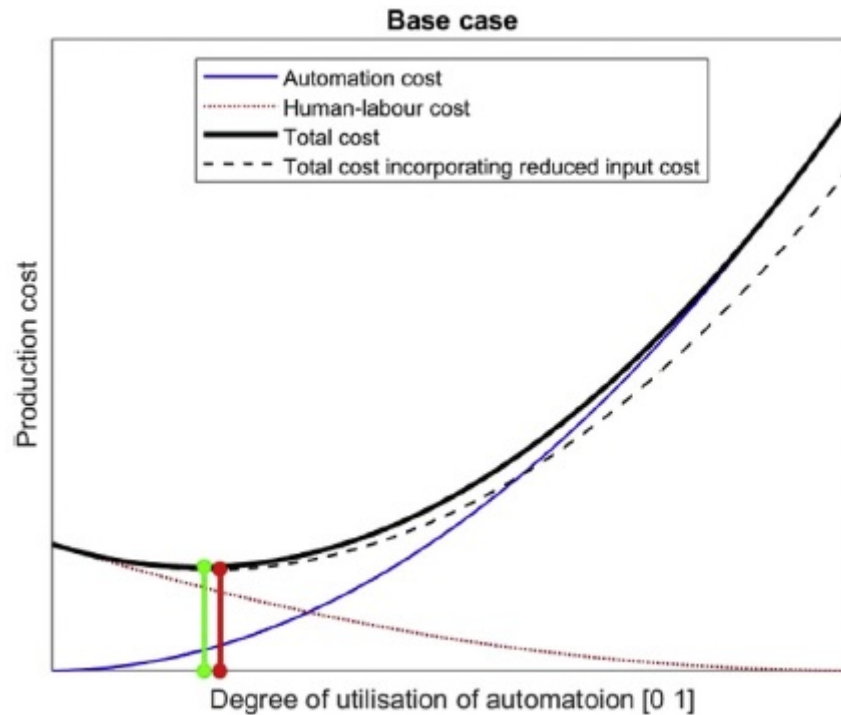


Figura 8: Costi di produzione in base al grado di automatizzazione del sistema produttivo.

1.2 Legislazione e normativa relativa ai robot

Come già accennato, la legislazione vigente relativa agli standard costruttivi e di sicurezza non prende in considerazione specificatamente i robot agricoli. I costruttori che vogliono commercializzare agrobot quindi, si devono rifare essenzialmente alla "Direttiva macchine" (2006/42/CE): definisce i requisiti di sicurezza essenziali riguardanti progettazione, fabbricazione e funzionamento che qualsiasi macchina⁵ deve rispettare prima dell'immissione in commercio. Oltre a questa direttiva, ci sono anche numerose certificazioni e standard volontari da tenere in considerazione [2]:

- EN ISO 10218: standard di sicurezza riguardante i robot industriali. Definisce 4 principi base per la sicurezza:
 1. Arresto del robot quando un operatore entra nello spazio condiviso.
 2. Possibilità di avere la guida manuale.

⁵Macchina: qualsiasi sistema "equipaggiato di un sistema di azionamento diverso dalla forza umana o animale diretta, composto di parti o di componenti, di cui almeno uno mobile, collegati tra loro solidamente per un'applicazione ben determinata o per una specifica attività". Fonte: DNV.it

3. Il robot mantiene la velocità e la distanza impostate dall'operatore.
 4. Il design e i controlli delle macchine autonome devono limitare la forza impattante in caso di eventi di contatto.
- ISO 15066: integra l'ISO 10218 con nuovi requisiti di sicurezza per robot industriali che collaborano con l'uomo.
 - ISO 18497: specifica i principi di design per i trattori autonomi e gli standard di sicurezza e per la fornitura di informazioni per l'utilizzatore finale.
 - EN 61058: definisce i SIL ovvero i "Safety Integrity Levels". Riguardano i sistemi da utilizzare per l'arresto di emergenza; indicano il grado di affidabilità che un sistema deve raggiungere per ridurre il rischio di incidente.
 - EN 62061: armonizza i SIL ai contenuti della direttiva macchine.

Queste leggi e standard da soli non sono sufficienti per definire un quadro normativo completo per gli agrobot; oltre agli standard costruttivi e di sicurezza ci sono infatti altri aspetti tipici ed esclusivi di questo tipo di tecnologia [4]. Il primo di questi aspetti è rappresentato dalla gestione delle informazioni raccolte durante le lavorazioni. I dati raccolti dai sensori dei robot, una volta memorizzati nei cloud, potrebbero essere oggetto di acquisizione da parte di terze parti che potrebbero avere interessi nell'impossessarsi di uno specifico terreno. Questo possibile problema sarebbe ancora maggiore se l'ipotetico robot venisse operato da un terzista che quindi raccoglie informazioni da appezzamenti appartenenti a proprietari diversi. A riguardo, la legge attualmente in vigore è la "General Data Protection Regulation" e sebbene si riferisca solamente alla protezione di dati personali, contiene alcuni principi che possono essere utili anche per gli agrobot. I principali sono sicuramente quelli riguardanti il consenso necessario per condividere e acquisire le informazioni, la "data minimisation" ovvero la limitazione della raccolta di dati personali ai soli scopi necessari per cui vengono raccolti e il loro trasferimento ai soli paesi o organizzazioni extra-UE certificati dall'Unione stessa. È quindi necessario stabilire chi detiene le informazioni registrate dai Robot (azienda produttrice o azienda che lo possiede) per garantirne poi la sicurezza. Altro problema che andrà sicuramente analizzato è l'individuazione delle responsabilità in caso di incidenti; anche qui non c'è una legislazione specifica e si potrebbero creare delle situazioni ambigue nel caso in cui il robot crei incidenti a seguito di cambiamenti di percorso non programmati dall'operatore. Non essendo prevista ne una qualche tipo di registrazione ne polizza assicurativa, l'operatore potrebbe astenersi dal risarcire il danno sostenendo che l'azione che ha provocato l'incidente non era stata da lui programmata. È plausibile che in futuro verrà definito per legge che sarà

chi possiede e programma il cantiere di lavoro a dover rispondere di possibili danni [2]. Sicuramente devono essere mossi ancora molti passi prima di avere un quadro normativo completo per la robotica in agricoltura.

1.3 Obiettivo del lavoro

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di confrontare, durante un ciclo culturale di *Zea mays*, le lavorazioni effettuate dal robot della ditta Agrobot "Roboti 150D" e quelle effettuate da macchine operatrici tradizionali allo scopo di identificare i vantaggi apportati dall'utilizzo del robot. In particolare sono state comparate le operazioni culturali di erpicatura, semina e diserbo meccanico (sarchiatura). Con i dati ottenuti durante queste lavorazioni sono state effettuate le seguenti analisi:

- Analisi dei tempi di lavoro delle tre lavorazioni, con individuazione della capacità utile di lavoro, superficie dominabile e dimensionamento delle macchine operatrici.
- Comparazione della larghezza di lavoro effettiva e della potenza richiesta in base alla superficie soggetta alla lavorazione.
- Analisi della qualità di erpicatura tramite profilometria.
- Analisi della qualità della semina con rilevazione di deposizioni doppie, fal-lanze, semi al m² e profondità di semina.
- Analisi della produzione stimata di biomassa e granella.

2 DESCRIZIONE DEL ROBOT IN PROVA

2.1 Agroboti "Robotti 150D"

Il robot utilizzato per questo lavoro, prodotto dall'azienda danese Agrobot, è il modello "Robotti 150D". Si tratta di una macchina operatrice⁶ autonoma porta attrezzi. La dotazione tecnica comprende due motori diesel Kubota da 53Kw (72hp) ciascuno utilizzati rispettivamente per la trazione, idrostatica e attuata da 4 ruote motrici di cui le due frontali sterzanti, e per il funzionamento del sistema idraulico (da 40 l/min) e della PTO (programmabile a 540 o 1000 rpm). Il carburante è stoccato in due serbatoi da 100 litri ciascuno. Le macchine operatrici sono collegate al robot da un tradizionale attacco "a tre punti". La carreggiata è regolabile in un range da 1.65 a 3.65m; la larghezza della stessa deve essere scelta in fase di acquisto in quanto non modificabile una volta assemblato (cambiano elementi strutturali del telaio, elemento portante del sistema). È dotato di un interasse di 1.55m ed è alto 2.15m. La sterzata è effettuata dalle ruote anteriori e il loro angolo massimo di 90° di rotazione, permette di far ruotare Robotti su se stesso facendo perno sulle ruote posteriori. È dotato di un attacco a tre punti con una capacità di sollevamento di 750 kg. La macchina pesa 3150 kg.



Figura 9: Visione frontale e laterale Robotti 150D.

Il sistema di guida autonomo è attuato grazie ad un ricevitore GPS-RTK, da un sistema laser-scanner LiDAR⁷ per la rilevazione di possibili ostacoli in campo e da un paraurti sensorizzato per fermare il robot in caso di urti accidentali. La programmazione del piano di lavoro avviene all'interno della Webapp Agrobot (Figura 10) e si serve di alcune operazioni preliminari. Per prima cosa è necessario definire i confini dell'appezzamento oggetto delle lavorazioni per delimitare,

⁶Fonte: Scheda tecnica fornita da Agrobot.

⁷Sistema che identifica un sensore che riesce a scansionare tridimensionalmente l'ambiente circostante illuminandolo con la luce laser.

tramite l'operazione di "geofencing", l'area di lavoro di Robotti (utile a eliminare incontri con ostacoli fissi). Questa operazione viene effettuata sempre tramite coordinate di georeferenziazione registrate da un'antenna GPS-RTK (anche del robot stesso). Successivamente si inseriscono una serie di parametri tecnici riguardanti sia la macchina operatrice che si andrà ad utilizzare (larghezza, lunghezza, se necessita di PTO e a che giri, se necessita di sollevamento fisso o flottante), sia la lavorazione stessa (larghezza delle capezzagne, velocità di lavoro e di svolta, sistema di lavoro). Questi parametri sono salvati così da non ripetere queste fasi qualora si dovesse ripetere un'operazione con lo stesso attrezzo in futuro (in Figura 10 è visibile il profilo creato per un erpice rotante). Una volta creato e approvato il piano di lavoro, esso viene trasferito al computer del robot (che è provvisto di un router internet), e tramite un monitor presente nello stesso si può dare inizio alla lavorazione. Il posizionamento in prossimità del punto di inizio del piano di lavoro si effettua manualmente grazie ad un telecomando remoto. La velocità in questa fase è limitata a 10 km/h mentre in fase di lavoro a 5 km/h. Per una questione di sicurezza, l'operatore che ha in possesso il telecomando, deve sempre attenersi ad una distanza inferiore ai 150 metri per garantirne la supervisione, superata la quale il robot si fermerà in automatico rendendo necessario il riavvio in manuale per far riprendere la lavorazione. Essa può anche essere monitorata in tempo reale sia tramite un indicatore di avanzamento, sia tramite una telecamera (non presente nella dotazione standard), nella Webapp Agriointelli. Per il lavoro in notturna possono essere installate luci anteriori e posteriori. Il prezzo di acquisto è di circa 200000 euro.

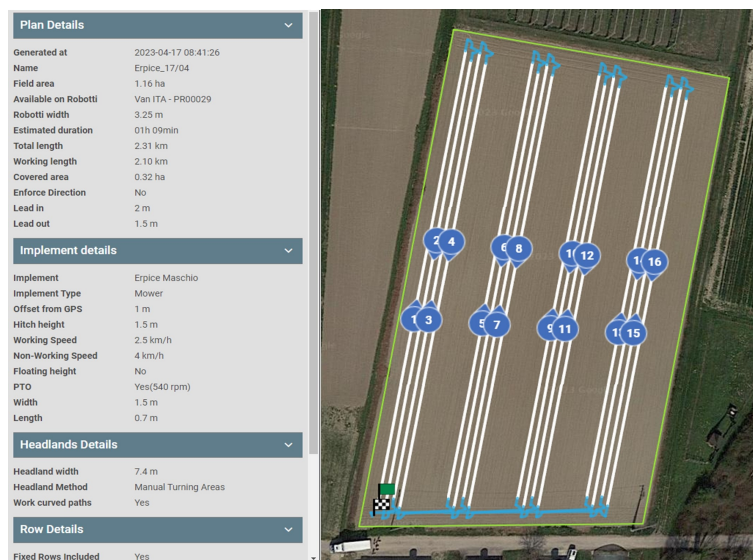


Figura 10: Esempio creazione cantiere di lavoro con Webapp Agriointelli

3 MATERIALI E METODI

3.1 Disegno sperimentale e cantieri di lavoro

Il ciclo culturale è stato svolto in un appezzamento di circa 1.2 ha dell'azienda sperimentale Lucio Toniolo dell'Università di Padova. Si tratta di un terreno non particolarmente tenace e tendente al sabbioso; il clima della zona è tendenzialmente temperato. L'appezzamento è ben esposto e, grazie all'assenza di elementi di disturbo, riceve luce per tutta la durata del giorno. Non dispone di un impianto di irrigazione fisso, ma durante la prova è stato disposto un sistema di irrigazione a manichette. È presente una scolina nel lato a Est.

Per questo lavoro si è optato per adottare uno schema sperimentale composto da 4 blocchi disposti nel senso dei lati lunghi dell'appezzamento; ciascuno di essi è stato poi suddiviso ulteriormente a metà per poter stabilire entrambe le tesi. Nel campo ciascuna tesi viene ripetuta 4 volte quindi.

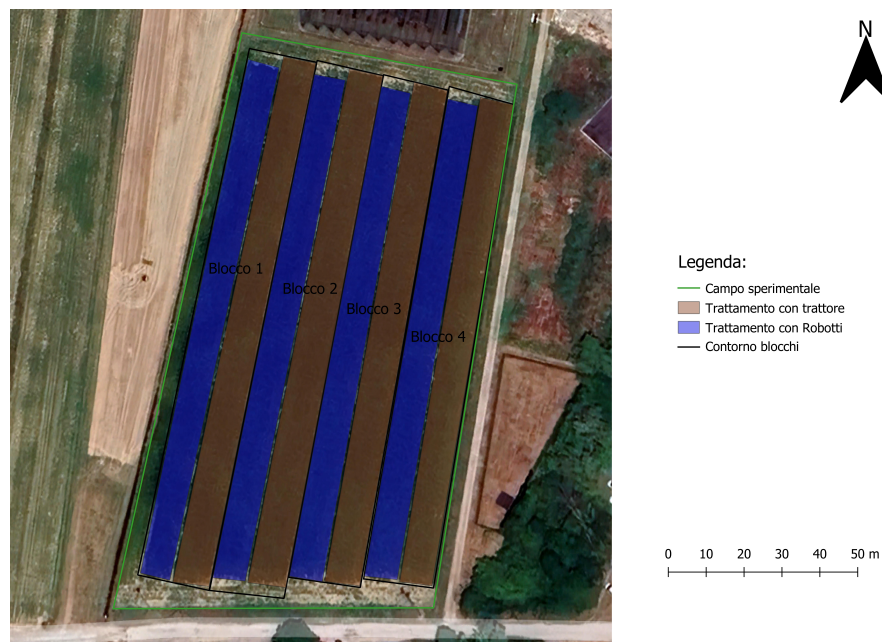


Figura 11: Schema sperimentale.

3.2 Misurazioni

3.2.1 Erpicatura

L'erpicazione è l'operazione di affinamento del terreno per preparare un adeguato letto di semina. Nel caso del campo prova è stata effettuata dopo aratura in data 17 aprile 2023. Per questo lavoro il robot era equipaggiato con un erpice rotante da 2.1m di larghezza mentre la trattrice (un Fiat 680H) era equipaggiato con un erpice Feraboli da 3,5m di larghezza. Trattandosi della prima esperienza con Robotti,

inizialmente si sono riscontrate alcune difficoltà nel caricamento del piano di lavoro e sono state necessarie alcune regolazioni (al sistema LiDar per esempio) per poter far operare il robot in maniera corretta. Durante la lavorazione si è proceduto alla rilevazione dei tempi di lavoro per poi svolgere l'analisi correlata. L'analisi dei tempi di lavoro è il principale mezzo per la valutazione delle performance delle macchine agricole. Tramite infatti la scomposizione della lavorazione agricola nelle sue fasi costitutive e la misurazione dei tempi correlati alle stesse, con il successivo calcolo di appositi coefficienti è possibile evidenziare vantaggi e svantaggi della lavorazione stessa comparando quindi Robotti con la trattrice convenzionale. Ecco di seguito la tipologia di tempi misurati e coefficienti calcolati per questa analisi. Tempi:

1. Tempo effettivo di lavoro ("TE"), rappresentato dal tempo in cui la macchina operatrice sta svolgendo la funzione per cui è stata costruita.
2. Tempi accessori di lavoro ("TA"), suddivisi in:
 - Tempi accessori di svolta e manovre sul campo ("TAV"),
 - Tempi accessori per la manutenzione ordinaria in campo e regolazione della macchina durante il lavoro ("TAC"),
 - Tempi accessori per i rifornimenti di materiali necessari per il funzionamento della macchina e per lo scarico del prodotto raccolto ("TAS").
3. Tempo operativo ("TO"), ottenuto dalla somma del tempo effettivo e tempi accessori di lavoro.
4. Altri tempi quali: tempi morti ("TM") che si riferiscono ad interruzioni durante il normale svolgimento del lavoro; tempo di ristoro o riposo ordinario ("TR") e tempo di preparazione sul luogo ("TPL")
5. Tempo di utilizzazione ("TU") ottenuto dalla somma tra il tempo operativo, TM, TPL e TR.

Con queste rilevazioni è stato possibile calcolare i seguenti coefficienti:

1. Rendimento operativo ("Ro"), permette di conoscere la frazione di tempo in cui la macchina operatrice sta svolgendo l'operazione per cui è stata designata (nel caso della semina quando la seminatrice è a contatto con il terreno quindi, vengono tolte le operazioni di svolta e di rifornimento e manutenzione eventuali). Più questo parametro si avvicina all'unità, più l'operazione è stata svolta efficientemente. Viene calcolato con il rapporto:

$$\frac{TE}{TO} = Ro \quad (1)$$

2. Rendimento di efficienza del cantiere di lavoro ("Rc"), permette di analizzare l'effettivo tempo durante il quale la macchina operatrice permane in campo nell'arco del periodo utile della giornata. Viene calcolato con il rapporto:

$$\frac{TO}{TU} = Rc \quad (2)$$

3. Rendimento di utilizzazione ("Rc"), permette di quantificare l'influenza dell'organizzazione del lavoro, delle caratteristiche tecniche della macchina e delle condizioni ambientali sulla capacità di lavoro della macchina stessa. Viene calcolato con la formula:

$$Ro * Rc = Ru \quad (3)$$

Unendo questi dati con quelli di velocità e larghezza operativa teoriche ed effettive e ai coefficienti enunciati sopra, è possibile calcolare la capacità di lavoro. Essa permette di ipotizzare la superficie dominabile dalla macchina operatrice durante il periodo utile in cui è possibile e/o si deve svolgere una determinata operazione agronomica. Anche in questo caso il parametro trovato sarà differente in base al tipo di coefficiente di rendimento ("Ro"; "Rc" o "Ru") a cui i dati di velocità e larghezza vengono rapportati. Abbiamo quindi:

1. Capacità effettiva, esprime la capacità di lavoro massima, teorica, della macchina in condizioni ideali di funzionamento. Viene calcolata con la formula:

$$0.1 * Ve * Le = Ce \quad (4)$$

dove "Ve" è la velocità effettiva registrata in campo, "Le" è la larghezza di lavoro e "0,1" un coefficiente utilizzato per esprimere la capacità di lavoro in ettari all'ora.

2. Capacità operativa, tiene conto dei tempi di svolta, rifornimento e manutenzione in campo. Esprime quindi la capacità in base alle condizioni operative. Viene calcolata con la formula:

$$Ce * Ro = Co \quad (5)$$

3. Capacità utile, tiene conto delle condizioni ambientali trovate durante il periodo utile della giornata lavorativa. Viene calcolata con la formula:

$$Co * Ru = Cu \quad (6)$$

4. Superficie dominabile (A_0): permette di conoscere la quantità di superficie lavorabile con una macchina operatrice con larghezza di lavoro nota, durante un periodo utile ("Pu", espresso in ore utili di lavoro). Per il suo calcolo è necessaria la determinazione di ulteriori parametri. Si deve innanzitutto determinare, conoscendo l'andamento climatico, i giorni di calendario ("gc"), ovvero quelli massimi consecutivi entro i quali si deve svolgere la lavorazione e quelli disponibili ("gd"), quelli in cui è possibile svolgere correttamente la lavorazione. Essi saranno sempre meno rispetto a quelli di calendario in quanto è possibile che ci siano stati giorni di pioggia e giorni in cui il terreno non sia praticabile perchè troppo bagnato. I giorni disponibili vengono quindi calcolati sottraendo dai giorni di calendario i giorni di pioggia e i giorni impraticabili. Per questo lavoro si sono utilizzati i dati della centralina meteo posta nell'azienda agraria stessa. Si devono poi calcolare i giorni lavorativi, ovvero quelli di calendario tolti i giorni non lavorativi come le domeniche e le festività (per questo caso studio si è optato per considerare solo la domenica come giorno non lavorativo). Fatto ciò si procede con il calcolo del coefficiente di sensibilità pedoclimatica ("Cpc"), che indica quanto il clima e l'ambiente incidono sulla possibilità di effettuare correttamente la lavorazione. Si calcola con la formula:

$$Cpc = gc/gd \quad (7)$$

Il coefficiente sarà tanto vicino a 1 quanto più il tempo è buono in quanto quasi tutti i giorni lavorativi possono essere utilizzati per effettuare la lavorazione e viceversa. A questo punto si calcolano i giorni utili ("gu") con la formula:

$$gu = Cpc * gl \quad (8)$$

Essi rappresentano i giorni in cui è realmente possibile effettuare la lavorazione. Essi solamente sono espressi in ore: si moltiplicano quindi i giorni lavorativi per le ore giornaliere utili di lavoro. Si è così ricavato il periodo utile ("Pu"):

$$Pu = cpc * gl * hg \quad (9)$$

5. Superficie dominabile, indica la superficie massima lavorabile in base ai giorni utili e alla capacità utile di lavoro. Calcolata con la seguente formula:

$$Cu * Pu = A_0 \quad (10)$$

Un'altra analisi effettuata è stata quella riguardo il dimensionamento del cantiere di lavoro. Essa permette di stimare la larghezza di lavoro della macchina

operatrice (erpice rotante in questo caso) necessaria ad effettuare la lavorazione di un appezzamento di larghezza data ("A"), durante il tempo utile. Per questo lavoro si è deciso di rapportare la larghezza effettiva alla potenza necessaria ad effettuare la lavorazione durante il periodo utile. A questo scopo si sono rilevate, dai listini di vari produttori di erpici, le potenze richieste (in kW) in base alla larghezza di lavoro per costruire un modello larghezza-potenza. Assumendo che la potenza aumenti linearmente con l' aumentare della larghezza operativa, si è costituito un modello di regressione lineare la cui equazione permette di stimare la potenza richiesta (incognita dell'equazione) ponendo come dato noto la larghezza operativa. La regressione utilizzata per l'erpicoltura è visibile in figura 12. Conoscendo poi il periodo utile di lavoro, rendimento di utilizzazione e velocità operativa, è stato possibile calcolare (con la formula riportata a fine paragrafo) la larghezza effettiva necessaria a lavorare varie superfici note. Convertendo poi la larghezza effettiva in potenza (kW) si è prodotto un modello "superficie - kW richiesti" che ha permesso di comparare tra le due tesi la potenza necessaria a lavorare la stessa quantità di superficie. A differenza del trattore, il robot presenta alcuni limiti strutturali riguardo la larghezza delle macchine operatrici: l'attacco a tre punti è infatti posto tra i due elementi del telaio che sorreggono i motori e non nella parte posteriore della macchina come per le trattatrici convenzionali (Figura 14); ciò implica che la larghezza delle macchine operatrici sia minore della larghezza tra i due elementi del telaio del robot. Inoltre qualora la larghezza di lavoro stimata sia maggiore rispetto a quella utilizzata per il cantiere di questa prova sperimentale, si riterrebbe necessario l'acquisto di un secondo cantiere equivalente per riuscire ad effettuare la lavorazione durante il periodo utile. Per questo motivo in questa tesi si è anche effettuata una stima del numero di ettari superato il quale sarebbe necessario l'acquisto di unità aggiuntive sia autonome che tradizionali. Nelle analisi effettuate, l'acquisto di un secondo mezzo è stato posto al numero di ettari in corrispondenza dei quali la larghezza effettiva ("Le") risulti maggiore di 2.1m, ovvero la larghezza massima del telaio di Robotti. Un terzo robot sarebbe quindi necessario con una larghezza effettiva maggiore di 4.2m. Per quanto riguarda la trattrice, anche in questo caso è stata operata una stima del numero di mezzi in base alla superficie da lavorare con lo stesso procedimento applicato per Robotti. Una seconda abbinata sarebbe quindi necessaria a 7m, una terza a a 10.5m e così via. Per questa analisi sono state considerate superfici fino a 120 ha. La larghezza effettiva stimata viene calcolata con la seguente formula:

$$\frac{10A}{Pu * Ve * Ru} = Le \quad (11)$$

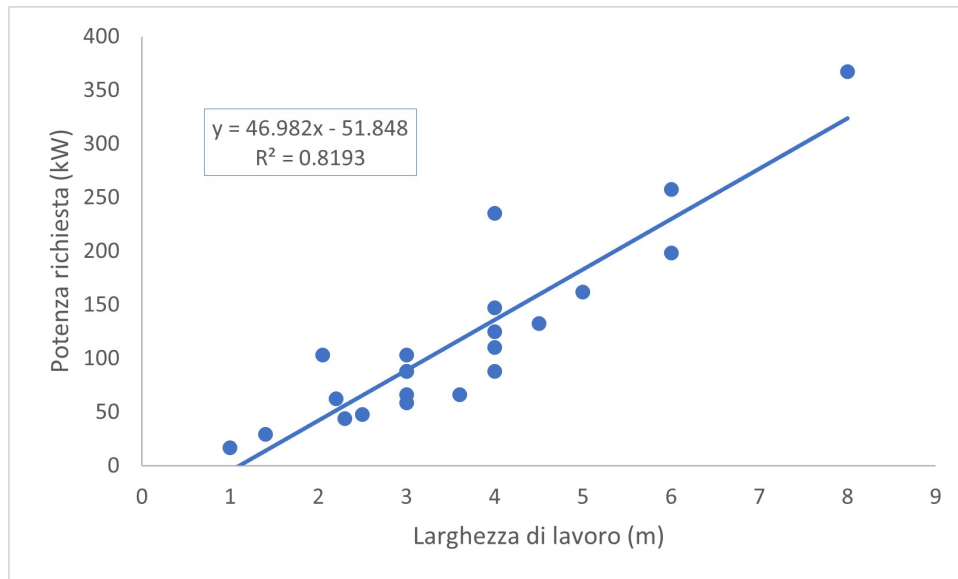


Figura 12: Regressione lineare larghezza-potenza erpicatura.

Per quanto riguarda la qualità della lavorazione è stata svolta un'analisi con un profilometro modello "pro4" di Leica Disto (Figura 13). Questo strumento permette di rilevare le differenze di omogeneità di un piano liscio restituendo dei grafici che indicano le differenze di profondità rispetto allo 0 (quindi alla base del piano utilizzato come riferimento).



Figura 13: Profilometro Leica Disto pro4.

3.2.2 Semina

La semina è l'operazione più importante di tutta l'annata agraria: tramite l'investimento di piante scelto è possibile programmare il livello produttivo che si vuole ottenere. In base alle specifiche caratteristiche morfologiche, ogni specie necessita di spazi differenti per la germinazione e futura crescita. Di conseguenza gli spazi tra i semi alla semina sono differenti tra specie e specie. Nel caso del mais e quindi della semina di precisione, i semi devono essere posizionati nel terreno a una distanza intra e inter-filare ben precisa per garantire un corretto sviluppo vegetativo. Viene quindi deciso un investimento teorico che solitamente si aggira tra le 5 e 7 piante al m². Nelle seminatrici questo parametro è solitamente impostato, attraverso diverse metodologie, tramite la distanza tra i semi; per questa coltura solitamente si tratta di 18-20 cm. Questo investimento teorico però, viene alterato da diversi fenomeni che avvengono durante la semina stessa. L'investimento effettivo dunque, si discosta sempre per una certa percentuale negativa da quello teorico. Di conseguenza la semina sarà più precisa quanto più l'investimento effettivo si avvicina a quello teorico. Per analizzare la precisione di semina vengono utilizzate tre classi di frequenza (convenzionalmente fissate dallo standard ISO 7556/1-1984) calcolate misurando la distanza tra due semi contigui:

- Deposizioni regolari: distanza tra la metà e 1.5 volte rispetto a quella teorica.
- Doppie deposizioni: distanza minore della metà della distanza teorica.
- Fallanze: distanza maggiore di 1.5 volte rispetto alla distanza teorica.

In una semina eseguita correttamente i semi devono rientrare per almeno il 90% nella prima classe di frequenza.

Ci sono diversi fattori che incidono sulla precisione di semina. Oltre al corretto settaggio della seminatrice, i due fattori maggiormente determinanti sono la velocità operativa e le vibrazioni correlate. Questo perchè con l'incremento della velocità e conseguentemente delle vibrazioni, gli elementi di deposizione del seme svolgono meno efficacemente la loro funzione. Prove svolte [14] su diversi tipi di sistemi di distribuzione del seme effettuate riportano come, successivamente all'incremento di velocità, i coefficienti "miss" e "multiple index" incrementino significativamente risultando in un indice di precisione di semina minore in tutti i casi analizzati. Le ragioni vanno ricercate nel design stesso degli elementi costitutivi dell'apparato di semina. Esso è essenzialmente costituito da un serbatoio contenente i semi, un dispositivo di selezione meccanica del seme che permette di selezionare dal serbatoio un singolo seme e di inviarlo a intervalli regolari nel sistema di trasporto fino al solco di semina. Le vibrazioni possono agire in tutti questi elementi, non facendo aderire i semi al disco di selezione, facendo sbattere o

rallentare i semi nel sistema di trasporto o nel peggiore dei casi, facendo sobbalzare l'intero elemento di semina comportando la fuoriuscita del seme dal solco.

Per questo lavoro la semina è stata effettuata in data 28 Aprile 2023. Il robot era equipaggiato con una seminatrice di precisione "Mascar" composta da tre elementi di semina. Per far rientrare questa macchina operatrice nell'ingombro del robot è stato necessario ridurre la distanza tra gli elementi di semina di 5 centimetri per elemento. Il mais quindi risulta seminato a 70 cm di interfila. Si è optato per un investimento teorico di 7.6 piante al m² (ovvero con una distanza teorica tra i semi di 18.8cm per il robot e di 17.5cm per la trattrice). È stata stabilita una profondità di semina di 3.5cm per le tesi di Robotti e di 4cm per le tesi trattate con la trattrice convenzionale. L'ibrido seminato era il P 1570 della ditta Pioneer. La semina con la trattrice convenzionale è stata operata da un terzista equipaggiato con una seminatrice di precisione "Monosem" a 4 elementi di semina azionata da una trattrice Lamborghini "r4.95" con una potenza di 70 kW. Il terzista non possedeva un sistema di posizionamento GNSS e quindi ha utilizzato gli indicatori di porche installati sulla seminatrice. Essi tracciano un solco a destra o a sinistra dell'attrezzo per indicare dove posizionare il trattore durante la passata successiva. Per prima cosa si è iniziato con la semina operata dalla trattrice. Al terzista sono state fornite le indicazioni di svolgere il lavoro come sua abitudine, senza tempi morti superflui che altrimenti avrebbero sfalsato le misurazioni. Una volta finita la semina, si è proceduto con l'operazione svolta dal robot. Anche in questo caso, una volta impostato il lavoro tramite lo strumento web Agpointelli, il robot ha proceduto a completare l'operazione in autonomia. Sono quindi state fatte le stesse analisi dei tempi di lavoro (rendimenti, capacità utile), di superficie dominabile e di dimensionamento del cantiere di lavoro spiegati nella sezione riguardo l'erpicoltura. Successivamente alla rilevazione dei tempi di lavoro e ad operazioni in campo concluse, è stata svolta la raccolta dei dati per l'analisi di omogeneità di semina. Ai fini della suddetta, i rilevamenti sono stati effettuati con la seguente metodologia: per ogni punto di campionamento veniva operato un solco della lunghezza di 1.43m e 1.33m per, rispettivamente, Robotti e trattrice, per poter risalire al numero di semi al m² (questa lunghezza moltiplicata per l'interfila utilizzata è pari ad un m²). Venivano dunque contati, per ogni punto di campionamento e per ogni fila della seminatrice, quanti semi erano presenti nel solco per la lunghezza determinata e veniva misurata la distanza tra ciascuno di essi. Infine per quattro semi delle corsie centrali (scelti per ridurre il più possibile l'errore dovuto alla vicinanza delle file alle carreggiate dei veicoli) è stata misurata anche la profondità. La raccolta di questi dati è iniziata in data 28 aprile 2023 ed è proseguita solamente il 5 maggio 2023 a causa di precipitazioni piovose che hanno reso impossibile eseguire i rilevamenti tra le due date. Inoltre, a causa

dello stadio germinativo avanzato e del terreno umido che rendevano difficili le operazioni di determinazione della profondità di semina, sono stati rilevati i dati di 2 dei 4 blocchi seminati. Si è optato per svolgere tre misurazioni per tesi, per blocco, disposte lungo la lunghezza dell'appezzamento. I rilevamenti sono stati prelevati da tutte le passate di Robotti e da due passate laterali e una centrale della trattrice per includere nei dati quanta più variabilità possibile. Sono quindi risultati 12 punti di rilevamento totali (Figura 16).



Figura 14: Robotti 150D e seminatrice Mascar.



Figura 15: Rilevazione omogeneità di semina.

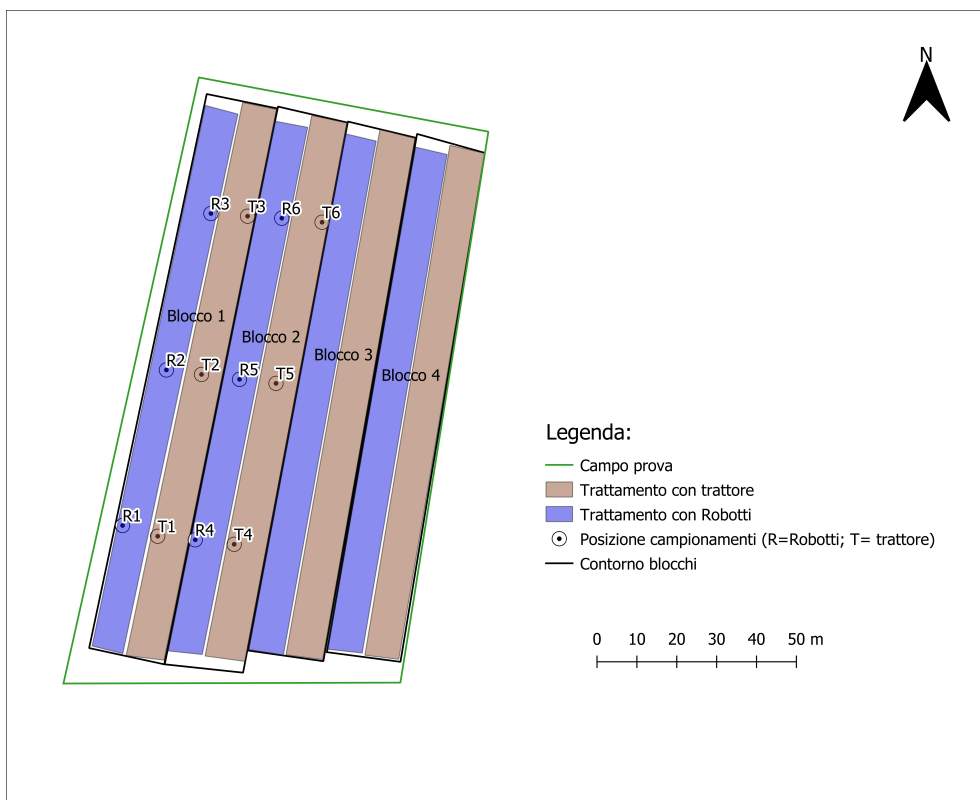


Figura 16: Schema punti di rilevamento per l'omogeneità di semina.

3.2.3 Sarchiatura

La sarchiatura è un sistema meccanico di eliminazione delle specie infestanti; viene attuata con degli organi discissori che tagliano e frantumano il terreno in superficie con l'obiettivo di interrare le infestanti e rompere ed esporre al sole gli organi ipogei delle infestanti stesse. In questo caso le lavorazioni per le due tesi si sono svolte in due giornate differenti. La sarchiatura con Robotti si è effettuata in data 30 Maggio 2023; esso era equipaggiato con un sarchiatore Oliver "Rotosark" composto da tre elementi lavoranti a loro volta costituiti da due rotori contrapposti e inclinati, che ruotando frantumano il terreno, una zappetta per lavorare il terreno non coperto dai rotori e due elementi per la rincalzatura. Anche in questo caso come per la seminatrice, è stato necessario modificare gli elementi di lavoro per adattarli all'interfila da 70 cm. Le tesi riservate al cantiere tradizionale sono invece state lavorate il giorno 31 maggio 2023. La trattrice utilizzata è stata un Fiat 680H (potenza di 90.5 kW) a cui è stato abbinato un sarchiatore Oliver "Rotosark" con una larghezza di lavoro di 3m. È dotato di telaio traslante controllato da un operatore che guida la macchina operatrice lungo la fila del mais (Figura 17). Per la sarchiatura si è optato per lo svolgimento della lavorazione a due differenti velocità per valutare qualora i rendimenti dei cantieri di lavoro subissero variazioni. Nel blocco 1 e 3 si è svolta a 3 km/h mentre nel blocco 2 e 4 a 5km/h. Anche

in questo caso si è proceduto con la registrazione dei tempi come spiegato nella sezione riguardante la semina. Anche per questo cantiere, le analisi effettuate sono state quelle relative ai tempi (rendimenti, capacità utile), superficie dominabile e al dimensionamento del cantiere di lavoro come spiegato nella sezione di questo capitolo riguardante l'erpicoltura.



Figura 17: I cantieri di lavoro della sarchiatura: trattore convenzionale (sinistra) e Robotti 150D (destra).

3.2.4 Biomassa in prossimità della raccolta

In prossimità della raccolta si sono svolti due tipi di rilevamenti. Il primo è servito per valutare quante piante al m² siano arrivate a maturazione rispetto alle piante al m² siano state seminate per determinare il tasso di sopravvivenza. Per questo scopo si sono raccolte, tagliandole a circa 10 cm dal terreno, le piante presenti in 1,43m lineari nelle tesi trattate con Robotti e in 1,33m lineari nelle tesi trattate con il trattore. Tali piante sono state contate e pesate per rilevare la numerosità, due di esse sono state poste in sacchi e pesate per rilevare la biomassa della piante intere (composte quindi da fusto, foglie, panicolo e tutolo) e infine sono state anche raccolte le pannocchie di tutte le piante contate per rilevare il peso totale della granella. Successivamente tutti i campioni sono stati messi in stufa a 105° per 48 ore (Figura 19) per calcolare le percentuali di umidità e quindi di sostanza secca della granella. Anche in questo caso si è deciso di rilevare tre campioni per tesi per blocco, coprendo sia le passate laterali che quelle centrali, raccogliendo un totale di 24 campioni (Figura 18). Successivamente, per stimare le produzioni ad ettaro si è rapportato il peso di ciascun campione alle umidità di riferimento ("Y_{ms}") decise per convenzione di 24% per la biomassa e il 14% la granella utilizzando la formula:

$$Y_{ms} = Y_m * \frac{100 - m}{100 - ms} \quad (12)$$

Dove "Y_m" è il peso rilevato alla raccolta del campione; "m" è l'umidità ottenuta dopo stufa espressa in percentuale e "ms" è l'umidità di riferimento. Essendo poi

i dati riferiti alle piante al m^2 , è bastato moltiplicarli per $10000 m^2$ per ottenere i dati di resa potenziale riferita all'ettaro.

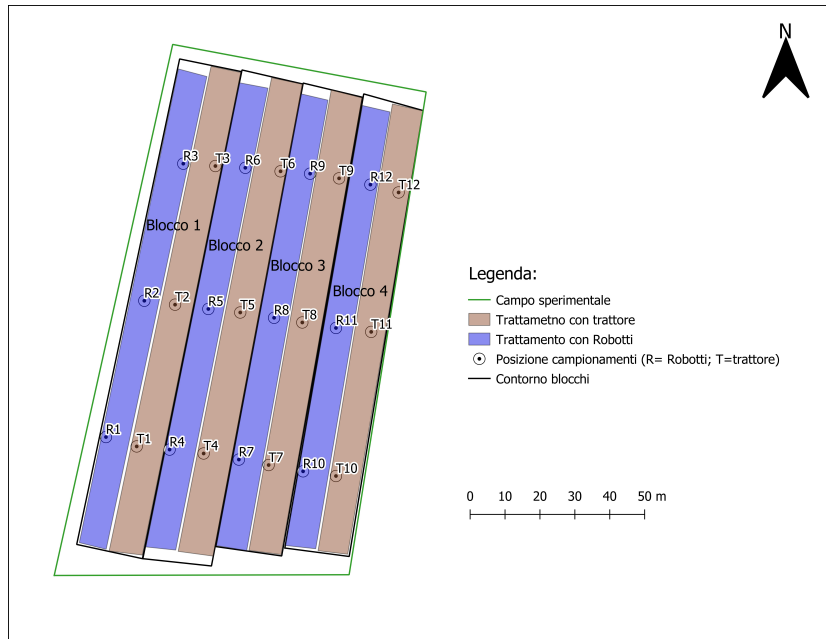


Figura 18: Schema punti di rilevamento per la biomassa in prossimità della raccolta.



Figura 19: Campioni di biomassa processati prima dell'inserimento in stufa.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Risultati

4.1.1 Erpicatura

L'analisi della qualità dell'erpicazione tramite profilometria ha restituito due grafici (uno per Robotti e uno per la trattrice) che non presentano sostanziali differenze (Figura 20 e 21). La lavorazione dunque è stata svolta con precisione simile tra le due tesi. Anche l'analisi della varianza non ha riportato differenze statisticamente significative come riportato in tabella 1.

L'analisi dei tempi ha rilevato un rendimento di utilizzazione del cantiere tradizionale maggiore rispetto a quello di Robotti, a causa della velocità e larghezza operativa maggiore (3 km/h contro 2.5 km/h) che accorcia il tempo effettivo di lavoro. Di conseguenza anche la capacità utile ovvero la superficie lavorata all'ora è maggiore per il trattore, che oltre alla velocità dispone in questo caso di una larghezza di lavoro maggiore. Passando invece al dimensionamento del cantiere di lavoro e i parametri utilizzati, il coefficiente di sensibilità pedoclimatica è risultato del 50%, a fronte dei 3 giorni di piovosità e 2 di impraticabilità stimati sui 10 giorni di calendario disponibili. Di conseguenza i giorni utili stimati sono risultati 4.5. Riguardo alle ore di lavoro giornaliere si è optato per assegnare 18 ore al robot in quanto grazie ai sistemi di sicurezza e alla guida GPS-RTK riesce a svolgere una lavorazione precisa anche con scarsa visibilità; alla trattrice sono state assegnate 6 ore. Nonostante la capacità utile minore, l'agrobot riesce durante il periodo utile, grazie alla possibilità di lavorare per più ore al giorno, a erpicare una superficie di terreno di 5.8ha in più rispetto alla trattrice convenzionale. Il maggiore periodo utile del robot incide anche sulla larghezza di lavoro e potenza richiesta in base alla superficie lavorata. Potendo infatti lavorare per più ore al giorno questi parametri sono minori rispetto a quelli stimati per la trattrice (Tabella 2 e grafico 22). Questo vantaggio risulta in minori costi operativi, consumi di carburante ed emissioni. Riguardo al numero di mezzi necessari in base alla superficie da lavorare, la maggiore efficienza di Robotti incide positivamente sulle superfici limite alle quali acquistare unità aggiuntive. Ciò infatti si verifica ad un numero di ettari inferiore rispetto a quanto accade per la trattrice; per esempio l'acquisto di un secondo robot si dovrebbe effettuare a 22ha mentre quello di una seconda trattrice a 18ha (Grafico 23).

Grabi libertà tot.	Fc	F (0.05)
101	0.01	0.95

Tabella 1: ANOVA effettuata sulla profilometria del suolo.

	Trattore	Robotti
Largh. di lavoro (m)	3.5	2.1
Vel. avanzamento (km/h)	3	2.5
Rendimento di utilizzazione	0.62	0.51
Capacità utile (ha/h)	0.75	0.32
Giorni calendario	10	10
Giorni lavorativi	9	9
Giorni di pioggia	3	3
Giorni impraticabilità	2	2
Giorni disponibili	5	5
Cpc	50%	50%
Giorni utili	4.5	4.5
Ore giornaliere	6	18
Periodo utile	27	81
Superficie dominabile (ha)	20.1	25.9

Tabella 2: Analisi tempi di lavoro e dimensionamento del cantiere di lavoro di erpicatura.

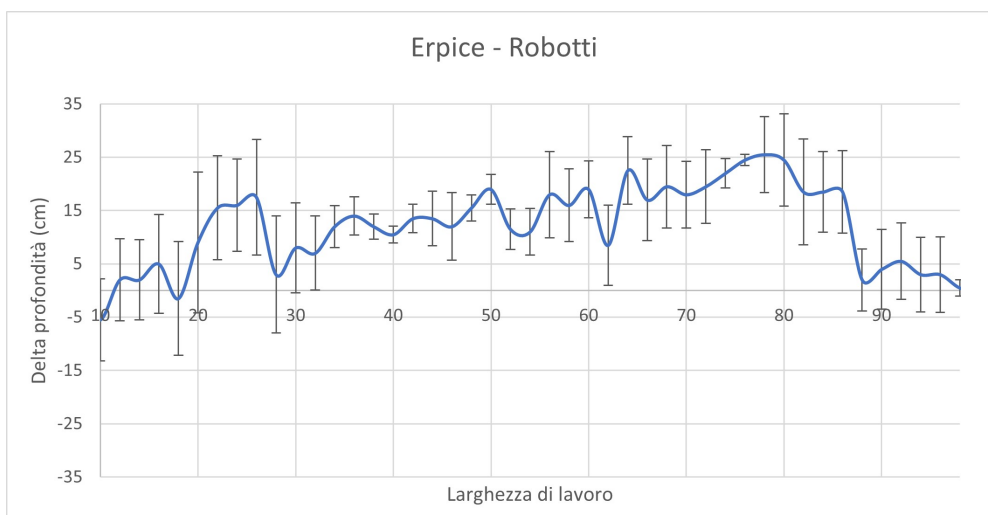


Figura 20: Grafico profilometria di Robotti.

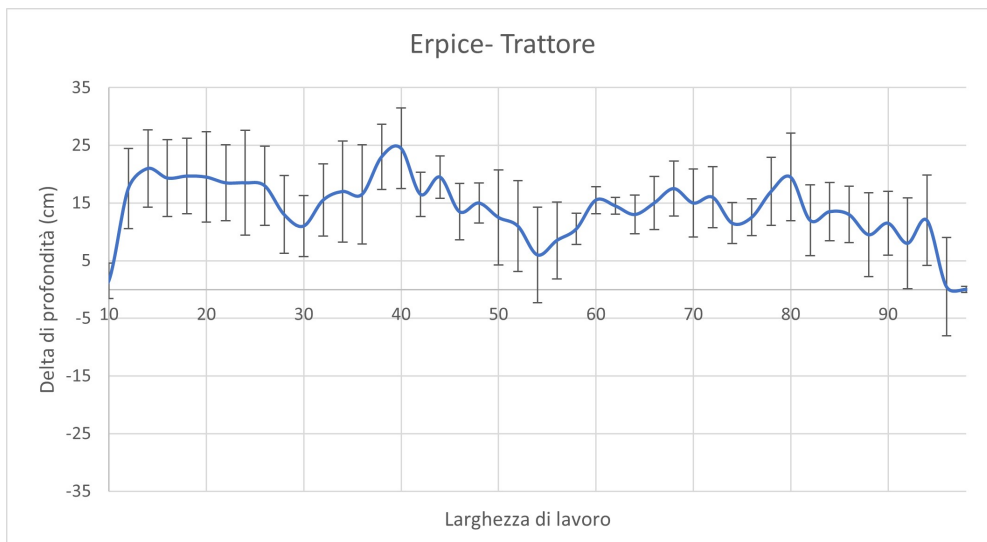


Figura 21: Grafico profilometria del trattore.

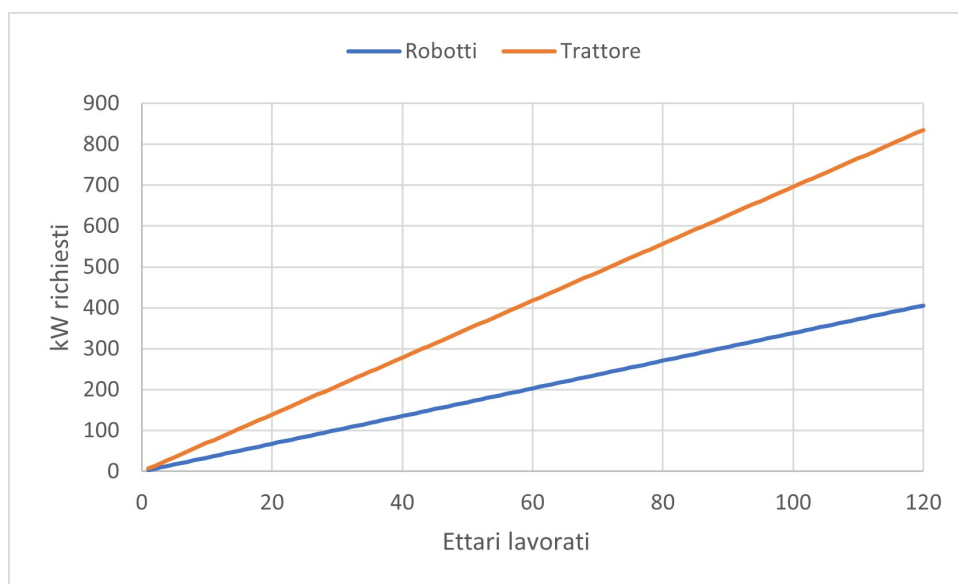


Figura 22: Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare (erpicoltura).

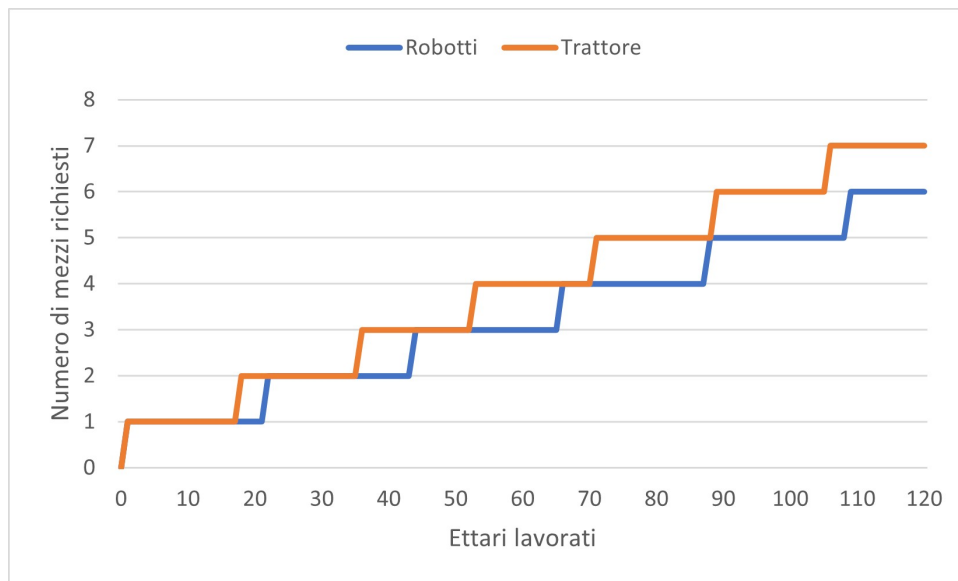


Figura 23: Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie (erpicoltura).

4.1.2 Semina

L'andamento dell'analisi dei tempi di lavoro ha prodotto risultati simili a quelli dell'erpicoltura (tabella 4). Si nota infatti un rendimento di utilizzazione maggiore nel caso del trattore dovuto essenzialmente alla maggiore velocità operativa dello stesso (Robotti è limitato a 5km/h). I tempi effettivi di lavoro e di svolta e manovra sono infatti sono sensibilmente più bassi nel caso del trattore (Tabella 3), che ha impiegato in media 36 secondi in meno per le passate e 38 secondi in meno per le svolte e manovre . Riguardo ai tempi di svolta, notevole importanza risiede anche nell'abilità dell'operatore (in questo caso un operatore esterno all'azienda Lucio Toniolo): se più esperto riuscirà a ridurli rispetto ad un soggetto con meno esperienza. A conseguenza di questi dati, anche la capacità utile di lavoro (quindi gli ettari lavorabili all'ora) è maggiore nel caso del trattore convenzionale rispetto al robot quanto questo parametro considera anche la larghezza e velocità effettiva di lavoro delle macchine operatrici, maggiore nel caso del trattore in questa prova sperimentale. Tra le due tesi dunque, all'ora, il trattore riesce a lavorare una quota maggiore di terreno rispetto al robot.

L'analisi sul dimensionamento è stata effettuata con i parametri riportati in tabella 5. Si è optato per 15 ore giornaliere per Robotti e 6 per la trattrice; il coefficiente di sensibilità pedoclimatica è risultato sempre del 50% a fronte dei 3 giorni piovosi e dei 2 impraticabili. Anche in questo caso, la maggiore velocità e larghezza operativa del cantiere di lavoro tradizionale hanno prodotto sia un rendimento di utilizzazione che capacità utile di lavoro maggiori rispetto a quelli del robot. Il trattore dunque riesce a seminare più superficie del robot a parità di ore

di lavoro. Robotti possiede però un periodo utile maggiore grazie alla possibilità di lavorare per più ore al giorno; la superficie dominabile ("A₀") risulta quindi comparabile e di poco superiore (0.27ha in più) rispetto a quella ottenibile dalla trattrice, anche se quest'ultima ha una velocità e larghezza operativa maggiore. Sempre grazie alla possibilità di lavorare per più ore al giorno, anche la larghezza operativa e di conseguenza la potenza richiesta a parità di superficie è minore per il robot, risultando in minori consumi, costi ed emissioni (Grafico 24). Vantaggio che aumenta in termini percentuali all'aumentare della superficie lavorata. Di contro, come si nota nel grafico 25, i limiti di larghezza operativa della seminatrice utilizzata per Robotti, rendono necessario l'acquisto di unità aggiuntive a superfici minori rispetto alla trattrice.

Passando all'omogeneità di semina, entrambe le tesi hanno effettuato una semina precisa, infatti le deposizioni regolari sono in entrambi i casi maggiori del 90% dei semi rilevati. Andando ad analizzare fallanze e doppie deposizioni (tabella 6), si notano andamenti contrastanti. Se nel caso delle fallanze il robot ne compie il 1.96% e il trattore l'1.12% (rispettivamente 7 e 4 su 357 rilevazioni); per le doppie deposizioni le due tesi hanno svolto un lavoro con precisione simile, attestandosi entrambe al 1.12% (4 per entrambe le tesi sul totale delle rilevazioni). Gli altri parametri rilevati sono stati il numero di piante per m², la profondità di semina e la distanza media seme - seme. Dai dati raccolti si può notare che, per quanto riguarda la distanza media di semina, il trattore si dimostra più preciso con una media di 17.6cm a fronte di 17.5cm teorici; il robot invece ha una distanza media di 20.6cm rispetto ai 18.8cm teorici (dato maggiore a causa del maggiore numero di fallanze che fanno aumentare la distanza media). Analizzando il numero medio di piante al m² però, risulta che Robotti si sia mantenuto sulle 8.1 piante mentre il trattore sulle 8.9 piante. Rispetto alle 7.6 piante al m² teoriche quindi, il robot è stato comunque preciso nonostante abbia compiuto più fallanze. È stato compiuto un buon lavoro anche rispetto alla profondità di semina: abbiamo infatti 3.5cm e 3.9cm di media rispettivamente per il Robot o e la trattrice convenzionale. Per tutti questi dati è stata eseguita l'analisi statistica *t* di Student a due code (Tabella 7). Ad una probabilità stabilita "α" del 5% sono risultati statisticamente significative le differenze nei dati di distanza media di semina e la profondità media, a significare che entrambe le tesi hanno rispettato i differenti parametri inseriti fase di programmazione del piano di lavoro.

	Trattore	Robotti
Tempo effettivo di lavoro (ore decimali/ha)	0.43	0.62
Dev. standard TE	0.008	0.01
Tempo di svolta e manovra (ore decimali/ha)	0.09	0.62
Dev. standard TAV	0.003	0.012

Tabella 3: Confronto TE e TAV del cantiere di semina.

	Trattore	Robotti
Largh. di lavoro (m)	3	2.1
Vel. avanzamento (km/h)	7	5
Rendimento di utilizzazione	0.59	0.41
Capacità utile (ha/h)	1.04	0.42

Tabella 4: Analisi tempi di lavoro del cantiere di semina.

	Trattore	Robotti
Giorni calendario	10	10
Giorni lavorativi	9	9
Giorni di pioggia	3	3
Giorni impraticabilità	2	2
Giorni disponibili	5	5
Cpc	50%	50%
Giorni utili	4.5	4.5
Ore giornaliere	6	15
Periodo utile	27	67.5
Velocità lavoro (km/h)	7	5
Superficie dominabile (ha)	28.08	28.35

Tabella 5: Analisi di dimensionamento del cantiere di semina.

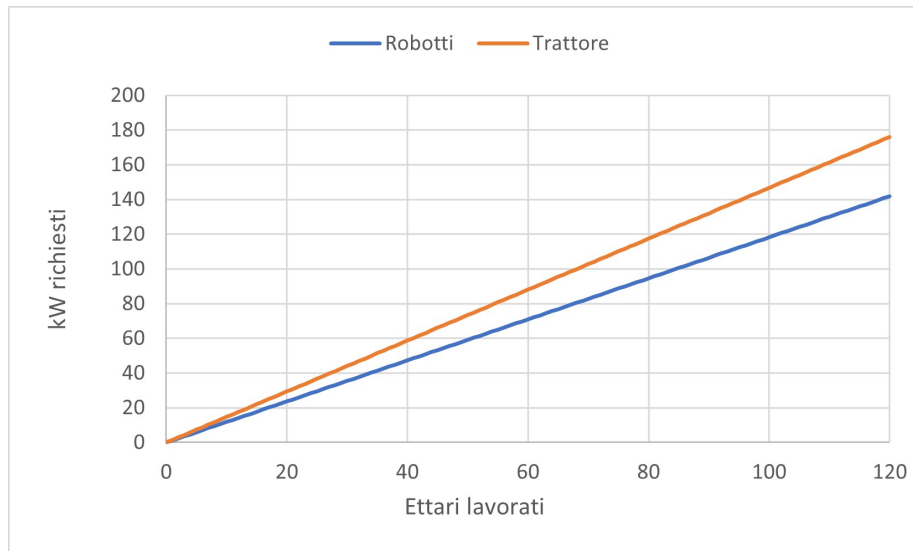


Figura 24: Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare (semina).

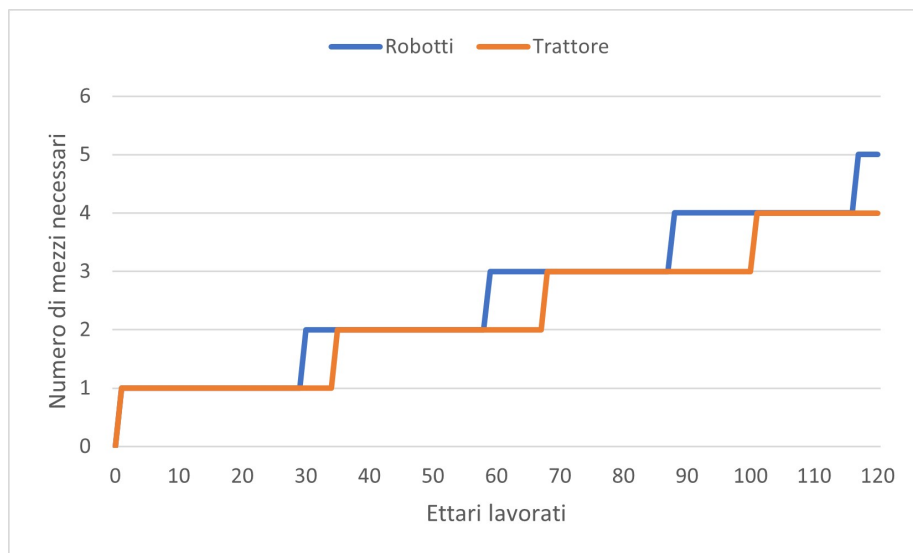


Figura 25: Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie (semina).

	Trattore	Robotti
Profondità media (cm)	3.9	3.5
Distanza media (cm)	17.6	20.6
Numero di piante al m ²	8.9	8.1

Tabella 6: Analisi qualità di semina.

	<i>P</i> value
Distanza media	2.07
Piante al m ²	0.003
Profondità media	0.12

Tabella 7: Analisi *t* di Student con " α " del 5% (semina).

4.1.3 Sarchiatura

L'analisi dei tempi per la sarchiatura è stata svolta aggiungendo una variante rispetto a quella della semina. La lavorazione è infatti stata svolta, sia da Robotti che dalla trattrice, a due velocità differenti: 3 e 5 km/h. In particolare è stata svolta alla velocità più lenta nei blocchi 1 e 3 mentre alla velocità maggiore nei blocchi 2 e 4. Anche in questo caso sono stati calcolati i rendimenti e coefficienti relativi a questa analisi. Come prevedibile, i tempi effettivi di lavoro sono minori a velocità più elevate; i tempi di svolta e manovra però risultano pressochè simili (Tabella 8). Ciò fa sì che si ottenga un rendimento di utilizzazione maggiore nel caso della lavorazione eseguita a 3 km/h: essendo a questa velocità il TE minore ma il TAV simile a quelli registrati a 5 km/h, il tempo operativo totale diminuisce rispetto alla velocità più lenta ma con una componente di svolte e manovre che incide di più sul tempo operativo stesso (Tabella 8). Apparentemente quindi il cantiere di lavoro a 3 km/h passa una percentuale di tempo maggiore a svolgere la lavorazione. Invece, nel calcolo della capacità utile di lavoro i dati ottenuti sono in linea con le caratteristiche tecniche dei mezzi: rispetto alle due velocità di lavoro entrambe le tesi lavorano più terreno all'ora grazie alla maggiore velocità operativa; mentre la trattrice possedendo una larghezza effettiva di lavoro maggiore, riesce in un'ora e ad entrambe le velocità a lavorare più terreno rispetto al Robotti.

Il dimensionamento ha prodotto risultati comparabili rispetto alla semina e all'erpatura. In questo caso, essendo stata svolta il 30 Maggio sono state stabilite più ore di lavoro giornaliere sia per Robotti (18 contro le 15 della semina) che per la trattrice convenzionale (8 contro le 6 della semina). Anche in questo caso sono stati optati 10 giorni disponibili: la sarchiatura va eseguita quando le malerbe sono appena germinate, per eliminarle quando hanno esaurito le risorse accumulate nell'endosperma del seme evitando così possibili ricacci. I 3 giorni di pioggia e i conseguenti 2 impraticabili rilevati dalla stazione meteo dell'azienda agraria anche in questo caso hanno fatto sì di ottenere un coefficiente di sensibilità pedoclimatica del 50%. A fronte di 9 giorni lavorativi, sono risultati 4,5 giorni utili (Tabella 9). Dai risultati si evince una maggiore superficie dominabile da parte di Robotti (" A_0 ") a entrambe le velocità adottate in questa prova sperimentale. In contrasto con i dati ottenuti dalla semina, Robotti riesce a lavorare un numero

di ettari decisamente maggiore rispetto alla trattrice. Questo perchè il cantiere tradizionale, a differenza delle altre due lavorazioni, lavora alla stessa velocità e quindi ha solo il vantaggio della maggiore larghezza operativa. Alla velocità più bassa però si nota uno scarso rendimento di utilizzazione; rispetto alla totalità del tempo di utilizzazione entrambe le tesi passano poco tempo effettuando la lavorazione rispetto al tempo totale di utilizzazione. Di conseguenza si ottiene una ridotta capacità utile, di 0.32 ha/h per il robot e 0.44 ha/h per il trattore. Anche se le velocità sono basse, anche per la sarchiatura, come nell'erpicoltura e nella semina, l'analisi del dimensionamento del cantiere fa osservare come anche in questo caso a parità di superficie da lavorare, Robotti necessita di una minore larghezza operativa e quindi potenza rispetto al trattore (Grafico 26). La stima del numero di mezzi da acquistare in base alla superficie in questo caso da risultati simili a quelli dell'erpicoltura, con l'acquisto di unità aggiuntive del cantiere autonomo a superfici minori rispetto a quelle della trattrice (Grafico 27). Tutti i dati e parametri appena citati migliorano notevolmente nell'analisi della lavorazione effettuata a 5 km/h (Tabella 10). Risulta infatti un maggiore rendimento di utilizzazione e una maggiore capacità utile di lavoro. Lavorando a velocità maggiori sarebbero inoltre necessari meno robot e trattrici per lavorare superfici fino a 120ha, con il cantiere autonomo che richiederebbe un'unità in più a superfici maggiori rispetto alla trattrice anche in questo caso (Grafico 29). Ancora una volta è minore anche la potenza richiesta a parità di superficie (28).

	Trattore	Robotti	Trattore	Robotti
Larghezza effettiva (m)	3.0	2.1	3.0	2.1
Velocità effettiva (km/h)	3	3	5	5
Rendimento di utilizzazione	0.65	0.67	0.55	0.57
Capacità utile di lavoro	0.44	0.32	0.55	0.40
Velocità effettiva (km/h)	3	3	5	5
Tempo effettivo di lavoro (ore decimali/ha)	0.94	1.45	0.64	0.9
Dev. standard TE	0.18	0.128	0.026	0.028
Tempo di svolta e manovra (ore decimali/ha)	0.31	0.32	0.48	0.46
Dev. standard TAV	0.007	0.054	0.006	0.003

Tabella 8: Analisi tempi di lavoro, TE e TAV della sarchiatura a 3 e 5 km/h.

	Trattore	Robotti
Giorni calendario	10	10
Giorni lavorativi	9	9
Giorni di pioggia	3	3
Giorni impraticabilità	2	2
Giorni disponibili	5	5
Cpc	50%	50%
Giorni utili	4.5	4.5
Ore giornaliere	8	18
Periodo utile	36	81
Velocità lavoro (km/h)	3	3
Superficie dominabile (ha)	15.8	25.9

Tabella 9: Analisi di dimensionamento del cantiere di lavoro di sarchiatura a 3km/h.

	Trattore	Robotti
Giorni calendario	10	10
Giorni lavorativi	9	9
Giorni di pioggia	3	3
Giorni impraticabilità	2	2
Giorni disponibili	5	5
Cpc	50%	50%
Giorni utili	4.5	4.5
Ore giornaliere	8	18
Periodo utile	36	81
Velocità lavoro (km/h)	5	5
Superficie dominabile (ha)	19.8	32.4

Tabella 10: Analisi di dimensionamento del cantiere di lavoro di sarchiatura a 5km/h (sarchiatura).

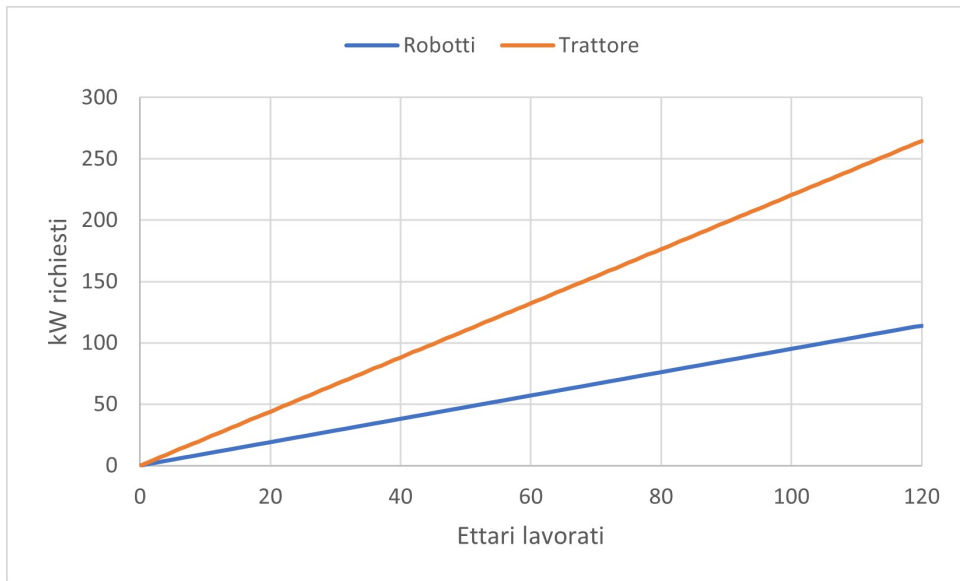


Figura 26: Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare a 3km/h (sarchiatura).

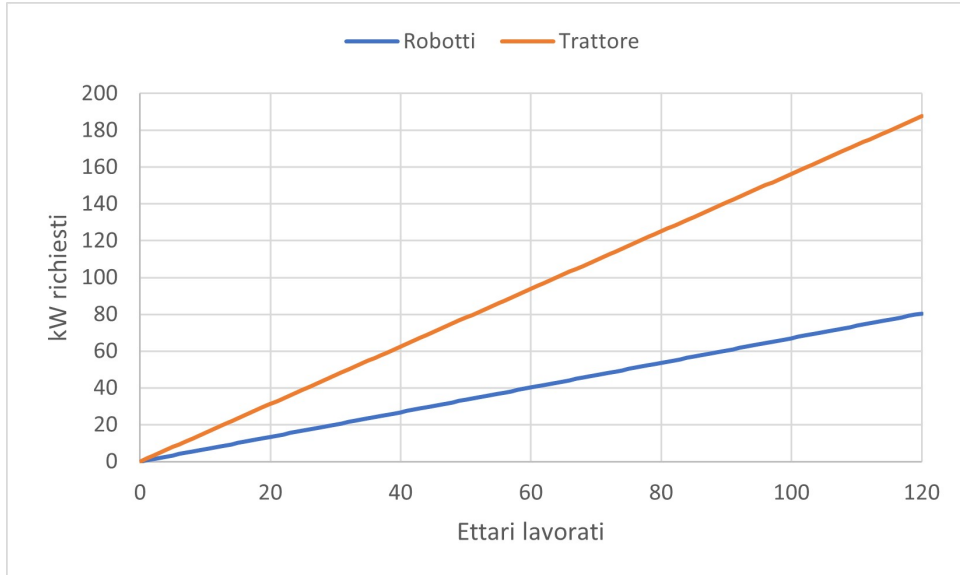


Figura 27: Confronto della potenza richiesta in base alla superficie da lavorare a 5km/h(sarchiatura).

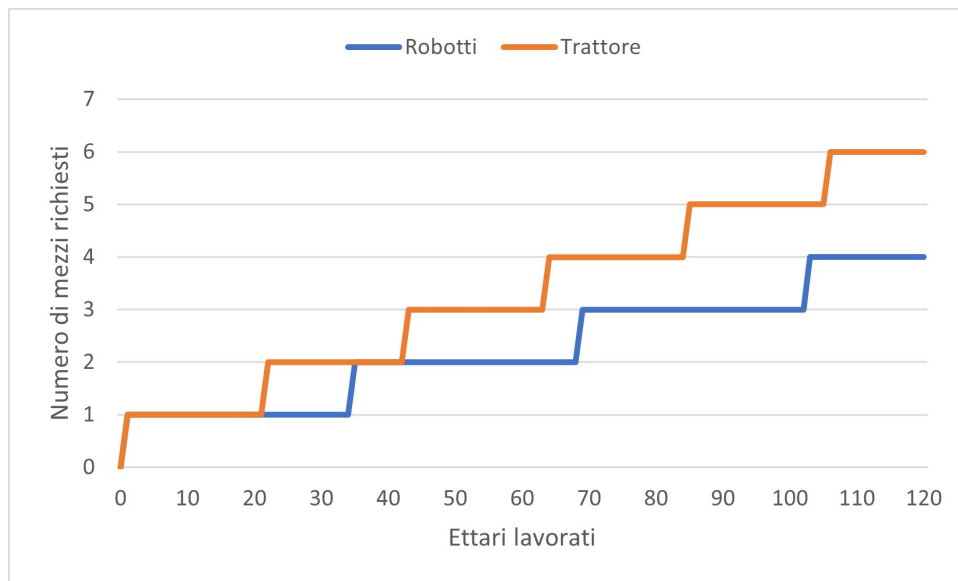


Figura 28: Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie a 3km/h (sarchiatura).

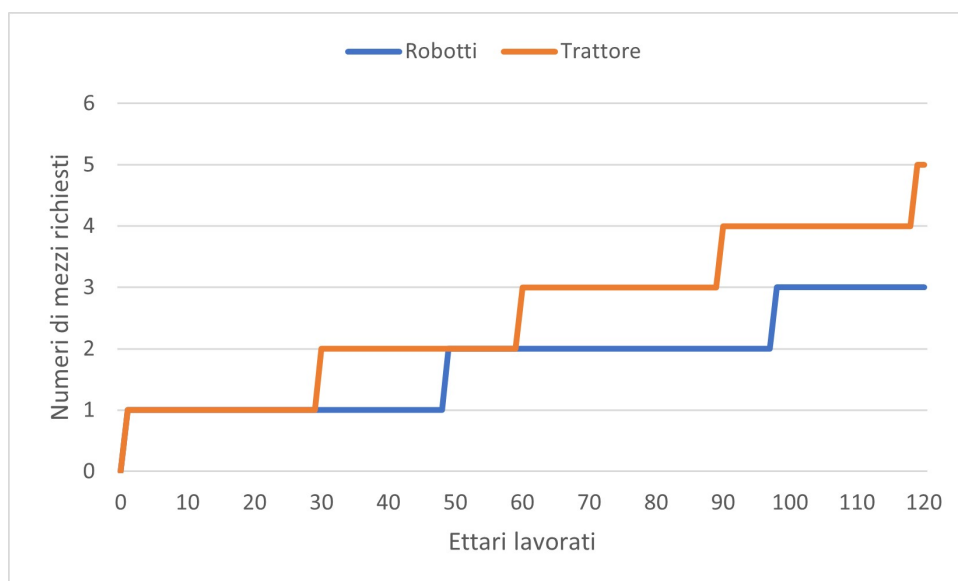


Figura 29: Stima del numero di mezzi necessari in base alla superficie a 5km/h (sarchiatura).

4.1.4 Biomassa in prossimità della raccolta

Il primo dato ricavato dalle analisi della biomassa in prossimità della raccolta è stato il tasso di sopravvivenza delle piante. Risulta che le tesi trattate con Robotti hanno un migliore tasso di sopravvivenza (94.5%) rispetto a quelle trattate con il cantiere tradizionale (88.3%). La maggiore precisione della seminatrice ha quindi consentito alle tesi del cantiere autonomo di perdere un minore numero di piante

durante il ciclo colturale. Per quanto riguarda la resa in prossimità della raccolta, come spiegato nel capitolo "materiali e metodi", per ogni campione è stato possibile calcolare la resa a ettaro potenziale. In media è possibile affermare che in entrambi i trattamenti le rese di biomassa (per un'ipotetica produzione di insilato) e granella rapportate all'umidità di riferimento del 28% e 14%, sono a buoni livelli (Tabella 11). Si tratta di circa 30000 kg/ha di biomassa e 15000 kg/ha di granella stimati dalla media ottenuta di tutti e 24 i campioni selezionati. Il test t di Student con una probabilità scelta " α " del 5% ha prodotto P value superiori al 5%; le differenze riscontrate sono quindi dovute essenzialmente ai rilevamenti e le reali produzioni non differiscono tra di loro (come si vede anche nel grafico 30 e grafico 31).

	Trattore	Robotti	P value
Resa biomassa (kg/ha)	32039,1	31004.5	0.56
Dev. st. resa biomassa	5130.4	3296.2	/
Resa granella (kg/ha)	14902.5	15136.3	0.82
Dev. st. resa granella	2806.4	2082.5	/
Numero piante alla raccolta	7.8	7.6	0.75
Dev. st. n. piante raccolta	1.17	0.52	/

Tabella 11: Confronto tra rese medie di biomassa e granella e tra numero di piante alla raccolta con P value.

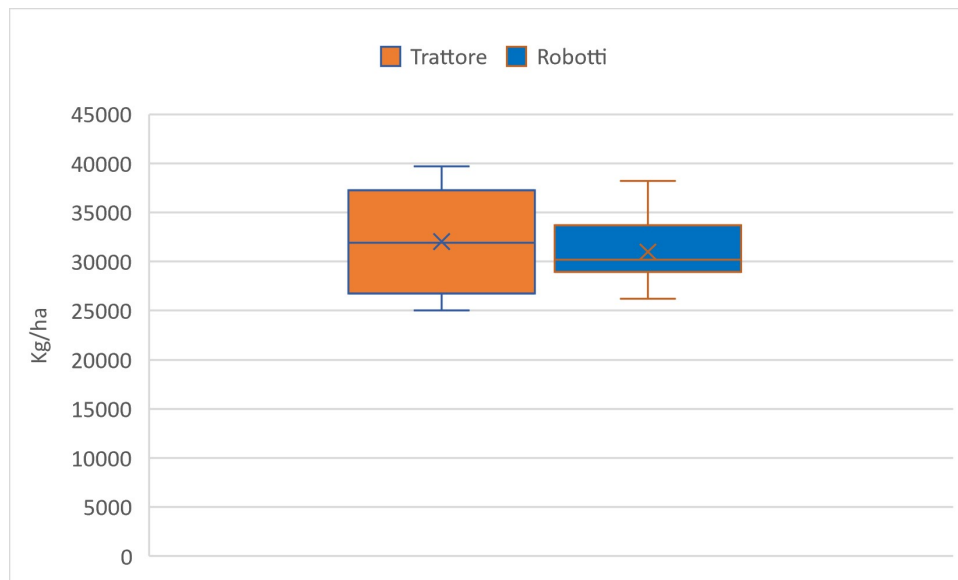


Figura 30: Confronto della produzione media stimata di granella.

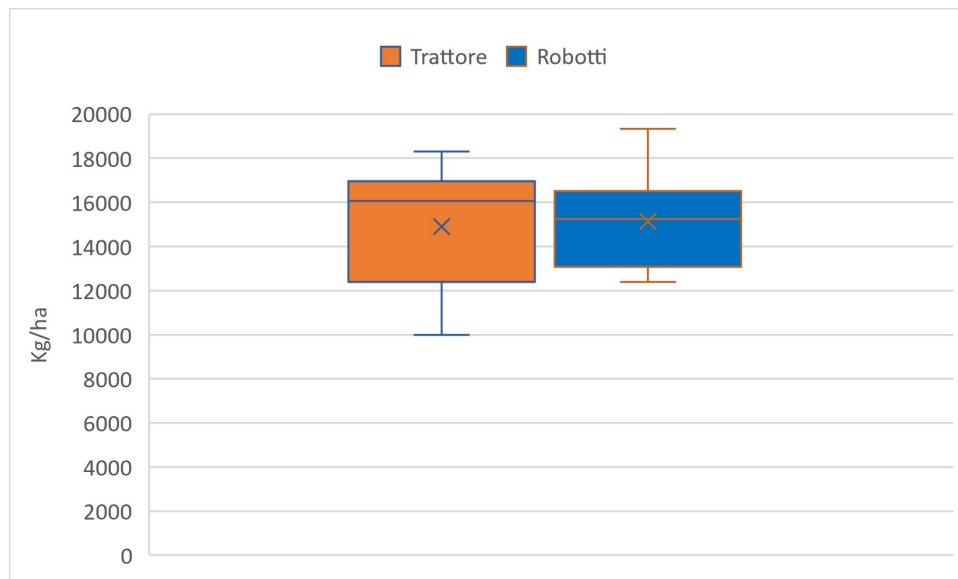


Figura 31: Confronto della produzione media stimata di granella.

4.2 Discussione

L'analisi dei cantieri effettuati durante un'annata agraria di *Zea mays* ha permesso di ottenere un buon inquadramento delle principali differenze tra le lavorazioni eseguite da una trattrice tradizionale e da Robotti 150D, mettendo in evidenza pregi e difetti di entrambi. Sicuramente è possibile affermare che a livello qualitativo l'agrobot oggetto di studio ha svolto lavorazioni comparabili quantitativamente e qualitativamente a quelle della trattrice convenzionale. La profilometria del suolo, gli indici qualitativi della semina, e i parametri rilevati in prossimità della raccolta hanno infatti prodotto risultati simili, con test statistici che non hanno evidenziato differenze significative tra le due tesi. Si riscontrano differenze significative solamente nel tasso di sopravvivenza (ovvero la percentuale di piante portate a maturazione rispetto a quelle seminate); ciò è probabilmente dovuto al maggior numero di piante al m² seminate dalla trattrice. Infatti è stato riscontrato che la seminatrice più datata Monosem utilizzata dal terzista ha depositato alla semina 8.9 piante in media rispetto alle 7.6 teoriche e alle 8.1 depositate in media dalla Mascar, di recente messa in campo, di Robotti (P value calcolato di 0.002 con $\alpha=0.05$). Una maggiore densità potrebbe aver innescato fenomeni competitivi che hanno portato alla non sopravvivenza di alcune piante di mais. Sebbene le piante rimanenti abbiano compensato quelle non sopravvissute, portando di fatto a livelli produttivi e di granella comparabili a quelli di Robotti (P value calcolato di 0.82 per la produzione di granella e 0.76 per la produzione di biomassa con $\alpha = 0.05$), nel caso di Robotti si può affermare che vi è stato un risparmio notevole di sementi. La trattrice ha ottenuto un tasso di sopravvivenza del 88.3%, rispetto alle 8.9

piante al m² seminate, dato che porta a 7.8 piante al m² portate a maturazione, con una perdita stimata di 1.1 piante al m². Rapportato ad ettaro questo dato si converte in 11000 piante (e quindi sementi) sprecate perchè non hanno portato a produzione. Questo stesso calcolo effettuato sulle tesi di Robotti porta ad una perdita stimata di sole 0.4 piante al m², ovvero 4000 piante non arrivate a maturazione a ettaro. Il risparmio di semente è tangibile, senza contare i semi risparmiati già in fase di semina, con il cantiere autonomo che ha risparmiato ulteriori 8000 piante ad ettaro avvicinandosi di più all'investimento al m² teorico scelto (7,6 piante al m²). Questo dato non è attribuibile esclusivamente alla precisione maggiore ottenuta con il robot in quanto le due seminatrici erano differenti, ma sicuramente evidenzia l'importanza degli investimenti in macchine e attrezzature di nuova concezione e quindi più innovativi. Questo aspetto è comprovato dalla bibliografia. In un articolo [10] viene confrontato il numero di mezzi necessari a compiere un trattamento fitosanitario con atomizzatore in un impianto di produzione di orchidee. È risultato che i mezzi più avanzati (in questo caso quelli dotati di standard ISO11783 e georeferenziazione dei dati acquisiti in campo) riescono a razionalizzare i fattori produttivi e riducono quindi i tempi dovuti alla ricarica e rifornimento della macchina operatrice. Riducendo i tempi si riesce di conseguenza a lavorare più superficie a parità di tempo ed il numero di mezzi necessari scende di conseguenza (figura 32). Queste macchine operatrici avanzate sebbene abbiano un maggiore prezzo iniziale, portano a notevoli risparmi una volta impiegati correttamente.

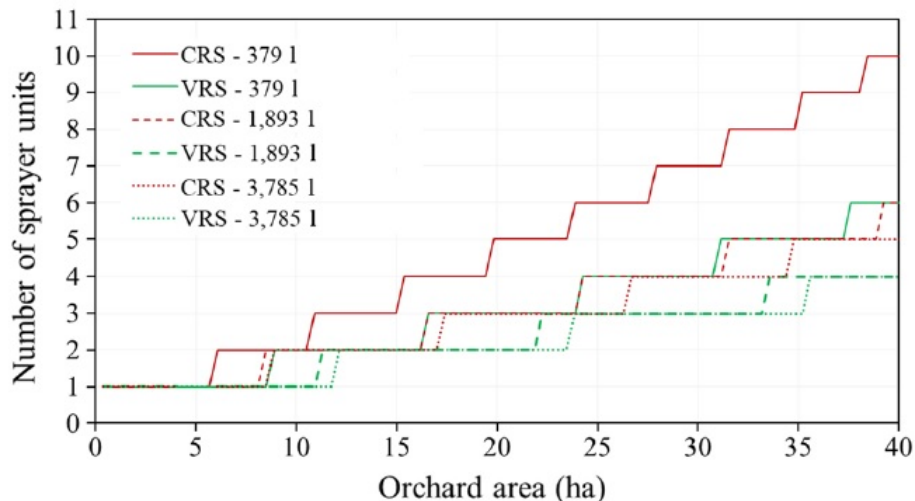


Figura 32: Confronto fra il numero di mezzi tecnologicamente avanzati ed obsoleti necessari a lavorare pari superfici.

L'analisi dei tempi di lavoro ha invece prodotto risultati sfavorevoli per il cantiere autonomo, che paga il fatto di avere larghezze effettive di lavoro e talvolta velocità operative minori rispetto a quelle della trattrice. Il rendimento utile calco-

lato per ciascun cantiere, che indica il quantitativo di tempo passato effettivamente ad effettuare la lavorazione, è infatti maggiori per la tesi tradizionale per le lavorazioni di semina ed erpicatura. In questi la trattrice sfrutta la sua maggiore velocità operativa e soprattutto di svolta per ridurre i tempi in cui la macchina operatrice (erpice o seminatrice) non sta effettivamente svolgendo il lavoro per cui è stata costruita. Invece, il rendimento del cantiere di lavoro della sarchiatura, derivante dalle prove in campo effettuate mantenendo per entrambe le tesi la stessa velocità, sono risultati comparabili. Nel caso della sarchiatura si è verificato un fenomeno interessante. Come spiegato nel capitolo "Materiali e metodi", si è optato di eseguire la lavorazione a 3 km/h su due blocchi e a 5km/h sui rimanenti due. Con la riduzione del tempo operativo ("TO") osservata alla velocità più alta ma con il mantenimento di simili tempi di svolta e manovra ("TAV"), il rendimento del cantiere di lavoro ("Rc"), sia della trattrice che dell'agrobot, è più alto alla velocità più bassa. Rispetto al tempo totale infatti, a 3 km/h la macchina operatrice passa una percentuale di tempo maggiore lavorando rispetto alla totalità del tempo operativo. Ciò evidenzia il buono svolgimento delle fasi di lavoro di Robotti che riesce ad essere efficiente tanto quanto un cantiere tradizionale. È giusto sottolineare che le velocità operative del robot sono limitate dalla casa madre a 5 km/h, rendendo impossibile svolgere prove a velocità maggiori. Velocità, larghezza di lavoro e rendimento maggiori, hanno consentito al trattore di ottenere anche capacità utili (parametro che esprime gli ettari lavorabili all'ora) maggiori. A parità di ore lavorate dunque e per tutte le lavorazioni la trattrice riesce a processare più superficie rispetto a Robotti.

Riscontri positivi dovuti esclusivamente al robot sono quelli dovuti alla possibilità di lavorare per più ore al giorno rispetto alla trattrice e sono stati evidenziati dall'analisi del dimensionamento delle macchine operatrici. Il primo riguarda la superficie dominabile: nonostante la minore larghezza di lavoro, l'agrobot consente comunque di ottenere un numero di ettari lavorabili durante il periodo utile equiparabile se non superiore a quelli del trattore, nonostante (come nel caso della semina) esso operi con velocità e larghezza di lavoro maggiori. Nel caso della sarchiatura, dove le lavorazioni sono state effettuate alla stessa velocità, il cantiere automatizzato riesce addirittura a lavorare 26.8 ettari in più rispetto al trattore seppur, anche in questo caso, esso operi con una maggiore larghezza di lavoro. Ciò consente di effettuare la lavorazione in una finestra temporale ridotta, permettendo di intervenire nella giusta fase di crescita delle infestanti e ottenendo quindi una migliore lavorazione. Nel caso della semina, che può avere ancora meno giorni di calendario a disposizione e soprattutto per le semine autunnali (durante le quali la stagione è più incerta), la possibilità di coprire più superficie a parità di tempo rispetto ai cantieri tradizionali consente di assicurare all'ipotetica azienda agraria di

terminare la semina entro il limite di tempo massimo, lasciando il tempo al cereale di raggiungere lo stadio di sviluppo corretto per la vernalizzazione. La capacità di lavoro potenziale di Robotti inoltre, può aumentare ulteriormente qualora si preveda, in fase di acquisto, di optare per la configurazione con la carreggiata di 3.65m. Ciò permette di utilizzare macchine operatrici larghe fino a 3.3m (più di un metro rispetto a quelli utilizzati in questa prova sperimentale). Nel caso di semina e sarchiatura significherebbe lavorare una fila in più per passata, portando così la capacità utile rispettivamente a 0.6 ha/h e a 0.57 ha/h (a 5 km/h), la superficie dominabile della semina a 40.5ha rispetto ai 28.35ha stimati alle condizioni operative della prova sperimentale (sarebbero 12.42ha in più della trattrice) e la superficie dominabile della sarchiatura a 5 km/h a 46.2ha rispetto ai 32.4ha. Si tratta di un incremento del 17% e del 18% per, rispettivamente, il primo e il secondo cantiere. Solo aumentando la larghezza operativa si riuscirebbero a lavorare più ettari all'interno del periodo utile quindi. Ancora più vantaggi si possono ottenere se Robotti potesse lavorare a velocità maggiori di 5 km/h, a cui è attualmente limitato per questioni di sicurezza e mancanza di un quadro normativo completo (problema già analizzato nell'introduzione di questa tesi). Prendendo come riferimento il cantiere di semina, in cui il terzista ha lavorato a 7 km/h contro i 5 km/h di Robotti; qualora le due velocità si fossero eguagliate, la capacità utile sarebbe aumentata ulteriormente, arrivando a 0.99 ha/h (quasi ad eguagliare quella della trattrice) e la superficie dominabile arriverebbe a 66.8 ha (ulteriore incremento del 25%). Durante la semina si è notato che un altro importante fattore che limita il rendimento di Robotti sono i lunghi tempi di svolta in confronto a quelli del terzista, molto esperto e quindi veloce nell'eseguire le manovre. Tali tempi rimarrebbero costanti pur aumentando la velocità operativa, in quanto un aumento di questo parametro non comporta un corrispettivo aumento della velocità di manovra. Si potrebbe ovviare a questo svantaggio facendo lavorare il robot a file alternate (opzione prevista in fase di programmazione della lavorazione dalla webapp Agrountelli); in questo modo i tempi di svolta sicuramente si avvicinerebbero a quelli del terzista, rendendo quindi più simili anche i rendimenti. Ipotizzando infatti che, grazie a queste modifiche, Robotti abbia lo stesso rendimento del cantiere di lavoro ("Rc") della trattrice (0.59) in quanto vanno alla stessa velocità, il vantaggio risulta ancora più marcato (come si vede in figura 33 e 34): l'acquisto di un'unità in più di Robotti e seminatrice avverrebbe a superfici maggiori rispetto a quelle della trattrice, contrariamente a quanto stimato in questa prova sperimentale. Così facendo infatti, diminuirebbe la larghezza effettiva di lavoro, e di conseguenza la potenza stimata necessarie a coprire la superficie da lavorare; che sarebbero ancora più limitate rispetto a quelle della trattrice. Si ridurrebbero così costi operativi, carburante ed emissioni inquinanti. Minori potenze richieste per

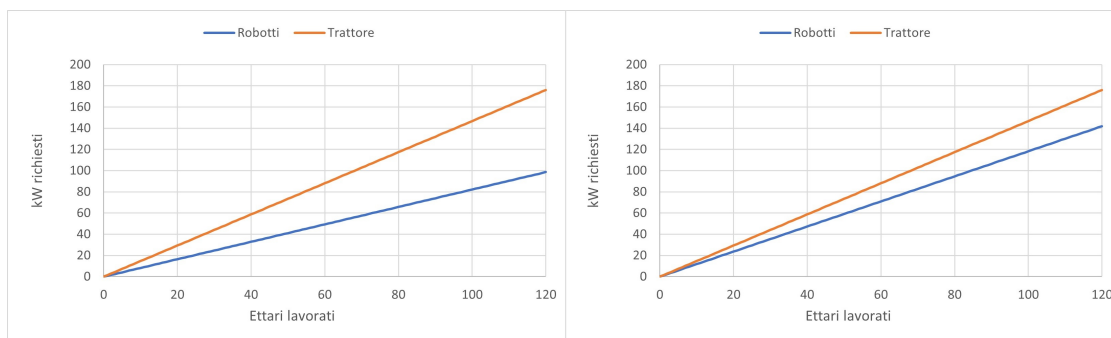


Figura 33: Confronto fra potenze richieste fra la simulazione alle stesse condizioni operative della trattrice (a sinistra) e con le condizioni registrate durante questa prova sperimentale (a destra).

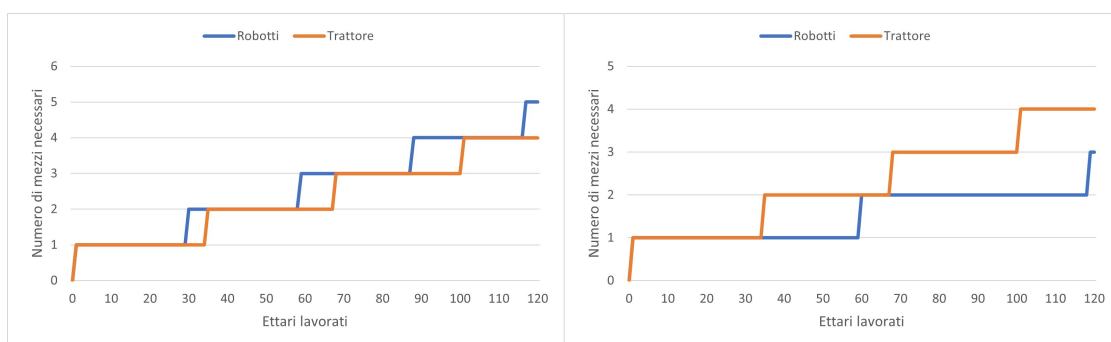


Figura 34: Confronto fra il numero di ettari a cui è necessario acquistare uno e due robot alle stesse condizioni operative della trattrice (a destra) e con le condizioni registrate durante questa prova sperimentale (a sinistra).

lavorare pari superficie si sono riscontrate già nei calcoli effettuati con le condizioni registrate durante la prova sperimentale, dove il robot non veniva "sfruttato" a pieno (per esempio la carreggiata del veicolo a disposizione era minore rispetto a quella massima) e consentiva di utilizzare macchine operatrici con larghezza operativa di massimo 2.1 metri. Utilizzare meno kW a parità di larghezza di lavoro rispetto alla trattrice consente di ridurre il carico motore e la conseguente usura, unita a quella del impianto idraulico e anche di risparmiare carburante. Ciò consente di ridurre notevolmente i costi di esercizio; fattore non di secondo piano a causa delle maggiori quote di reintegra, rispetto ad una trattrice di pari caratteristiche, generate dal maggiore investimento all'acquisto e dalla minore durata utile. Questo vantaggio aumenta nel caso di lavorazioni che non necessitano della PTO in quanto il motore adibito alla sua alimentazione non viene acceso dal robot; limitando notevolmente l'usura dello stesso. Un elemento particolarmente caratterizzante del robot oggetto di questa prova sperimentale è il design del telaio. Come già accennato nei paragrafi precedenti; ponendosi come motrice autonoma porta attrezzi, il Robotti prevede che le macchine operatrici vengano portate all'interno dell'ingombro del telaio. Ciò limita la larghezza operativa delle

stesse ma apporta anche alcuni vantaggi. In primis, una migliore distribuzione del peso, che è tutto scaricato sul robot, comporta una migliore trazione e quindi meno energia spesa per la stessa. Inoltre la versatilità apportata dal fatto di poter svolgere tutte le operazioni colturali con una sola macchina, permette di sfruttare al massimo i benefici del traffico controllato: spesso le trattrici utilizzate per questo tipo di conduzione dei terreni agricoli, devono essere convertite per poter utilizzare la stessa carreggiata e ciò comporta di dover sostenere ulteriori costi oltre a quelli di acquisto. Per i limiti posti alla circolazione nelle strade italiane, la larghezza dovrebbe essere limitata a 2.55 metri (stabilita dall'articolo 61 del Codice della Strada) per non essere immatricolato come "mezzo speciale"; per una trattrice così configurata ciò comporta lo svantaggio di dover compiere più passate rispetto a Robotti, la cui carreggiata massima arriva a 3.65m. Effettuando meno passate, a parità di superficie da lavorare, si riduce il terreno calpestato aumentando quindi quello utilizzabile per l'ipotetica coltura e migliorando la resa finale. Spesso poi, pur essendo in regime di traffico controllato, un'azienda agraria raramente riesce a effettuare tutte le lavorazioni con mezzi propri e deve quindi ricorrere al terziario, soggetto che non sempre è previsto di macchine modificate per questo tipo di tecnica agricola. Con Robotti, pur dovendo effettuare un maggiore investimento all'acquisto, si riuscirebbero a compiere tutte le lavorazioni con lo stesso porta-attrezzi, assicurandosi di calpestare, con un peso nettamente minore rispetto alle trattrici tradizionali, sempre la stessa porzione di terreno. Utilizzando macchine operatrici portate, il peso verrebbe scaricato interamente sugli pneumatici, assicurando un migliore scaricamento a terra della potenza prodotta dal robot. La già buona trazione verrebbe ulteriormente migliorata in quanto, utilizzando sempre le stesse carreggiate prive quindi di copertura vegetale, lo slittamento alla trazione è nettamente ridotto. Il ridotto slittamento è tradotto in una minore perdita di energia e consumi derivanti. Si riuscirebbe anche a colmare anche lo svantaggio di utilizzare attrezzature con larghezza operativa minore grazie alle maggiori ore di lavoro giornaliero. Questi principi di trattrice porta attrezzi e traffico controllato si sono rivelati efficaci anche se applicati in macchine destinate a cantieri di lavoro molto più grandi rispetto a quelli di Robotti. L'azienda tedesca Nexat propone infatti una macchina operatrice semovente con larghezza operativa fino a 24 metri il cui concetto è simile a quello di Robotti, con i vari moduli per le lavorazioni portati dal telaio e non trainati dietro alla macchina. Questo trattore, premiato con la medaglia d'oro all'AgriTechnica Innovation Awards 2022, dimostra di come questo tipo di scelta costruttiva e di gestione delle lavorazioni agricole sia efficiente e meriti di essere approfondito.



Figura 35: Trattore porta attrezzi Nexat (sinistra) e Robotti 150D.

5 CONCLUSIONI

Le nuove tecnologie apportate dall'agricoltura 4.0 come la guida satellitare GPS-RTK, sistemi di supporto alle decisioni e macchine operatrici per la gestione a rateo variabile, hanno permesso agli agricoltori di razionalizzare sensibilmente l'utilizzo dei fattori produttivi. Questi processi innovativi sono fondamentali per permettere all'agricoltura di soddisfare i bisogni alimentari di una popolazione mondiale in continua crescita, facendo i conti con la sempre maggiore difficoltà a reperire lavoratori specializzati, crisi climatiche e geopolitiche. Visti i suddetti vantaggi e l'automazione di numerose azioni che un tempo dovevano essere svolte manualmente dall'agricoltore, numerose aziende e start up hanno avviato la produzione dei cosiddetti "agrobot", ovvero mezzi totalmente autonomi e senza la necessità di essere operati da un conducente. Esse promettono di abbattere i costi di esercizio, migliorando allo stesso tempo le caratteristiche qualitative e quantitative della produzione agricola. Viste queste premesse, in questa tesi si sono voluti comparare durante un ciclo colturale di *Zea mays*, i cantieri di lavoro effettuati da un robot agricolo (Robotti 150D di Agrobot) e da trattrici convenzionali. Si sono analizzate le lavorazioni di erpicatura, semina e sarchiatura ed è stata effettuata un'analisi della biomassa in prossimità della raccolta. In particolare sono state svolte analisi riguardo i tempi di lavoro (rendimenti e capacità utile), il dimensionamento del cantiere di lavoro e analisi qualitative sulla precisione delle lavorazioni. Il calcolo dei rendimenti del cantiere di lavoro ha permesso di mettere in evidenza i principali limiti del sistema Robotti. Essi possono essere riassunti in una minore velocità operativa, limitata direttamente dalla casa madre e non tanto dalle potenzialità del robot e in una minore larghezza operativa massima data dal posizionamento dell'attacco a tre punti all'interno dell'ingombro del telaio. Questi elementi rendono il rendimento di utilizzazione e la capacità utile che ne deriva tendenzialmente più bassi rispetto ad un cantiere di lavoro tradizionale. Quest'ultimo quindi, a parità di tempo dedicato all'operazione colturale riesce a lavorare superfici maggiori. D'altra parte il dimensionamento ha invece evidenziato i molteplici punti forti dell'agrobot oggetto di studio, che si uniscono a quelli già apportati dal minore peso a parità di cavalli rispetto alle comuni trattrici, dall'utilizzo della tecnica del traffico controllato e del sistema di guida GPS-RTK. Il primo punto a favore è derivante dalla non necessità di avere un conducente: Robotti può così lavorare per più ore al giorno rispetto ad una trattrice. Ciò comporta una superficie dominabile uguale se non maggiore a parità di periodo utile. Le maggiori ore giornaliere di lavoro dunque permettono a Robotti di "neutralizzare" i suoi punti deboli ed essere produttivo tanto quanto, se non di più rispetto ad un cantiere tradizionale. Nel cantiere di semina infatti, nonostante la trattrice abbia una

maggior capacità utile di lavoro (1.04 ha/h contro 0.42 ha/h del robot), il cantiere automatico riuscirebbe comunque a lavorare più superficie: 28.35ha contro i 28.08ha della trattrice. Nel caso del cantiere di sarchiatura, dal quale i rendimenti sono stati calcolati alle stesse velocità per ambo le tesi, in 4,5 giorni utili Robotti riuscirebbe a lavorare 32.4ha contro i 19.8ha della trattrice. Questo vantaggio, se rapportato in base a pari superfici da lavorare, si converte in una minore larghezza operativa della macchina operatrice e quindi potenza necessarie ad effettuare tale lavorazione. Per lavorare i 32 ettari di superficie dominabile, al robot sono richiesti 21 kW, mentre alla trattrice ne servirebbero 50 kW; questo ridotto carico motore produce minori consumi, emissioni ed usure. L'ultima analisi effettuata è stata quella riguardante le superfici limite per acquistare un cantiere aggiuntivo di lavoro in base alle larghezze operative registrate durante questa prova sperimentale. Si riscontra che nelle lavorazioni in cui i rendimenti utili sono simili (quindi dove le velocità operative sono uguali o differiscono non significativamente) il robot riesce a lavorare più superficie prima che sia necessario l'acquisto di una sua unità aggiuntiva. Nel caso della semina invece, dove la trattrice procede ad una velocità operativa maggiore (7 km/h contro 5 km/h), i risultati sono opposti e la trattrice risulta più efficace da questo punto di vista. Si è però rilevato che facendo le stesse stime ipotizzando uguali velocità operative e quindi rendimenti, anche per il cantiere di semina Robotti risulterebbe più efficiente lavorando più superficie prima che ne sia necessario un'ulteriore acquisto.

Questa prova sperimentale è stata anche la prima esperienza dell'azienda agraria sperimentale Lucio Toniolo dell'università con il Robotti 150D, e come tale questo primo ciclo produttivo su mais è stato utilizzato anche per entrare in confidenza con tale mezzo. Acquisita l'esperienza delle prove in campo effettuate, sicuramente per sviluppi futuri sarà necessario prevedere alcuni accorgimenti per migliorare le prossime prove sperimentali. Il primo di essi è sicuramente quello di effettuare le due tesi in appezzamenti differenti. In questo modo si ottengono molti più dati, ma soprattutto i rendimenti non risentono del tempo necessario per lo spostamento da una tesi all'altra. Inoltre, per valutare ancora meglio vantaggi e svantaggi dovuti esclusivamente alle differenze tra robot e trattrice dei due tipi di cantieri, si potrebbero utilizzare le stesse macchine operatrici per mettere le due tesi nelle stesse condizioni operative. Per continuare a studiare questa tecnologia innovativa è anche necessario analizzare altre lavorazioni (dissodatura, semina con seminatrice universale e diserbo chimico per esempio) oltre a quelle effettuate per questa tesi.

In conclusione si può sicuramente affermare che questa tecnologia deve essere esplorata a fondo per comprendere a pieno i suoi punti di forza. Lo scopo di queste innovazioni, oltre a quello di ottenere produzioni di maggiore qualità e quantità,

deve essere quello di migliorare la qualità di lavoro degli agricoltori. Per ottenere ciò, è necessario sfruttare le tecnologie di agricoltura 4.0 e le maggiori ore di lavoro giornaliere del robot per ottenere cantieri di lavoro più efficienti rispetto a quelli tradizionali, come si evince dai risultati di questa prova sperimentale. Maggiore sviluppo in questa direzione è necessario anche per ottenere nuove innovazioni e soluzioni utili per abbassare i prezzi di acquisto dei mezzi autonomi; prezzi che attualmente sono proibitivi e che rendono quasi impossibile impossessarsi di questa nuova tecnologia in assenza di generose sovvenzioni da parte di enti pubblici, se non in casi di aziende molto grandi. Sicuramente con l'entrata nel mercato delle grosse aziende produttrici di trattori, che riusciranno quindi a sfruttare i vantaggi dell'economia di scala, gli agrobot saranno accessibili a più operatori del settore agricolo. Unitamente a questi processi è necessario un più alto livello di trasferimento tecnologico, incentivando l'entrata dei giovani in agricoltura e diffondendo maggiormente i principi dell'agricoltura 4.0 e della robotica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] J Baerdemaeker. “Artificial intelligence in the agri-food sector: Applications, risks and impacts”. In: *The study, Panel for the Future of Science and Technology; EPRS— European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit (STOA): Strasbourg, France* (2023), p. 91.
- [2] Subhajit Basu et al. “Legal framework for small autonomous agricultural robots”. In: *Ai & Society* 35 (2020), pp. 113–134.
- [3] Avital Bechar e Clément Vigneault. “Agricultural robots for field operations: Concepts and components”. In: *Biosystems Engineering* 149 (2016), pp. 94–111.
- [4] Lefteris Benos, Claus G Sørensen e Dionysis Bochtis. “Field deployment of robotic Systems for Agriculture in light of key safety, labor, ethics and legislation issues”. In: *Current Robotics Reports* 3.2 (2022), pp. 49–56.
- [5] EUR-Lex. *Comunicazione della commissione: Il Green Deal europeo*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
- [6] Vicent Gasso et al. “Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts”. In: *European Journal of Agronomy* 48 (2013), pp. 66–73.
- [7] Oscar Lagnelöv et al. “Life cycle assessment of autonomous electric field tractors in Swedish agriculture”. In: *Sustainability* 13.20 (2021), p. 11285.
- [8] J Lowenberg-DeBoer et al. “The impact of regulation on autonomous crop equipment in Europe”. In: *Precision agriculture’21*. Wageningen Academic Publishers, 2021, pp. 851–857.
- [9] James Lowenberg-DeBoer et al. “Economics of robots and automation in field crop production”. In: *Precision Agriculture* 21 (2020), pp. 278–299.
- [10] V. Marinoudi et al. “Robotics and labour in agriculture. A context consideration”. In: *Biosystems Engineering* (2019). DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.06.013.
- [11] Michael McGuire et al. “High Throughput Soybean Pod-Counting with In-Field Robotic Data Collection and Machine-Vision Based Data Analysis”. In: *arXiv preprint arXiv:2105.10568* (2021).
- [12] Luiz FP Oliveira, António P Moreira e Manuel F Silva. “Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead”. In: *Robotics* 10.2 (2021), p. 52.

- [13] Dimitrios S Paraforos et al. “Connecting agricultural robots and smart implements by using ISO 11783 communication”. In: *IFAC-PapersOnLine* 55.32 (2022), pp. 200–205.
- [14] Liu Quanwei et al. “Effect of travel speed on seed spacing uniformity of corn seed meter”. In: *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10.4 (2017), pp. 98–106.
- [15] B Raveendrakumaran et al. “Characterization traffic induced compaction in controlled traffic farming (CTF) and random traffic farming (RTF)-A multivariate approach”. In: (2022).
- [16] Jordan M Shockley, Carl R Dillon e Scott A Shearer. “An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production”. In: *Precision agriculture* 20 (2019), pp. 1068–1085.
- [17] Rajendra P Sishodia, Ram L Ray e Sudhir K Singh. “Applications of remote sensing in precision agriculture: A review”. In: *Remote Sensing* 12.19 (2020), p. 3136.
- [18] Marco Sozzi, Marco Benetti, Alessandro Zanchin et al. “Ecco chi sono i principali produttori di robot agricoli”. In: *MAD. MACCHINE AGRICOLE DOMANI* (2021).
- [19] Robert Sparrow e Mark Howard. “Robots in agriculture: prospects, impacts, ethics, and policy”. In: *precision agriculture* 22 (2021), pp. 818–833.
- [20] Tseganesh Wubale Tamirat et al. “Multi-stakeholder perspectives on field crop robots: Lessons from four case areas in Europe”. In: *Smart Agricultural Technology* 4 (2023), p. 100143.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento in particolare va alla mia famiglia e a Greta che mi hanno supportato e motivato durante il percorso di studi. Ringrazio inoltre il mio correttore, dott. Marco Sozzi, e il mio relatore, prof. Luigi Sartori, per l'opportunità e il sostegno fornitomi durante la realizzazione di questo progetto di tesi.