



**Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la
Natura e l'Energia**

Corso di Dottorato di Ricerca in Scienze e tecnologie per la
gestione forestale e ambientale - (XXV CICLO)

Titolo tesi di Dottorato di Ricerca

**Innovazioni tecnologiche della meccanizzazione dedicata alle piantagioni
da biomassa a scopi energetici: aspetti produttivi, economici ed
ambientali. (s.s.d. AGR/06)**

Tesi di dottorato di:

Dott. Vincenzo Civitarese

Coordinatore del corso

Prof. Rosanna Bellarosa

Firma

Tutore

Dott. Rodolfo Picchio

Firma.....

Co-tutore

Dott. Luigi Pari

Firma.....

28/05/2013

Summary

Technological innovations in energy crops mechanization: production, economic and environmental aspects.

The Ph.D. activity focused on the development of machinery, systems, and processes capable to improve the efficiency of agroforestry-energy chains, with particular reference to planting and harvesting. The innovations produced were tested in the field in order to assess their operational and economic potential, as well as their qualitative and environmental benefits.

Concerning planting, an automatic device for planting cuttings and a semi automatic machine for transplanting poplar poles were developed. These innovations brought about many economic, operational, and ergonomic benefits, such as the reduction of planting cost (-8%), the higher surface worked per year, and the improvement of working conditions for operators.

Concerning the harvesting of two-years poplar plantation, a new machine designed for harvesting and windrowing trees was specifically realized for two-pass operations. Use of this prototype can determine a 50% reduction of harvesting cost, and increase the surface worked per year.

The experience gained with two-pass harvesting of biennial poplar coppice has allowed to develop an ideal technique for five-year poplar coppice. In this respect, a new machine able to cut and windrow five years old trees and a self-propelled chipper with pick-up head were realized. The new system has allowed to simplify and speed up the working phases, minimizing biomass handling and the use of machines or equipment.

Furthermore, the technical characteristics of the self-propelled chipper favor efficient use also in two-year poplar plantations, both for single-pass and two-pass harvesting, thus solving many of problems encountered when using modified forage harvesters.

The introduction of a new process requires an accurate analysis of its potential environment and product quality impacts.

The study allowed evaluating the influence of moisture content on the particle size distribution of the chips produced. Furthermore, a model was developed for describing the drying process of cut trees windrowed in the inter-rows, as a function of the in-field

storage period. These two aspects are of great importance, and they rank among the main factors to be taken into account when determining the wood biomass quality.

Two-pass harvesting was also developed to prevent soil compaction and disturbance. In fact, the study has shown the lower degree of compaction produced by the new machine for felling and windrowing poplar trees, compared to modified foragers use in conventional operations.

Keywords: short rotation woody crops, planting, harvesting, prototypes, storage, soil compaction.

Riassunto

Innovazioni tecnologiche della meccanizzazione dedicata alle piantagioni da biomassa a scopi energetici: aspetti produttivi, economici ed ambientali.

L'attività di dottorato è stata incentrata sullo sviluppo di macchine e processi innovativi legati alle fasi di impianto e raccolta del pioppo a ciclo breve e medio. Le innovazioni prodotte sono state testate in campo al fine di valutarne le potenzialità operative e i benefici economici, qualitativi o ambientali, derivanti da un loro possibile utilizzo.

Per quanto concerne la fase di impianto sono stati sviluppati un dispositivo automatico di alimentazione delle talee e una trapiantatrice semiautomatica di astoni. Le prove sperimentali hanno evidenziato la possibilità di contrarre i costi d'impianto dell'8% e di incrementare la superficie annua dominata da ciascun operatore. Le caratteristiche tecniche della trapiantatrice di astoni, inoltre, consentono di ridurre l'affaticamento del personale preposto all'alimentazione della macchina.

Per quanto concerne la raccolta in due fasi è stata realizzata una nuova abbattitrice andanatrice per pioppo biennale. Il prototipo è in grado di ridurre i costi di raccolta del 50%, incrementando sensibilmente la superficie annua dominabile dalla macchina.

L'esperienza maturata nella raccolta in due fasi delle SRF ha permesso di sviluppare un cantiere ad hoc anche per il pioppo quinquennale, realizzando una seconda abbattitrice

andanatrice e una cippatrice semovente con testata pick up. Il nuovo cantiere consente di semplificare e velocizzare le fasi di lavoro, minimizzando la movimentazione della biomassa e l'uso di macchine e attrezzature di utilizzo più tipicamente forestale.

Le caratteristiche tecniche della semovente, inoltre, ne suggeriscono l'impiego ottimale anche su pioppo biennale (sia andanato che in piedi), risolvendo alcune delle problematiche legate all'utilizzo delle falciatrinciacaricatrici agricole.

L'introduzione di innovazioni di processo comporta un'attenta analisi del loro impatto sulla qualità del prodotto ottenibile e sugli effetti ambientali ad essi direttamente, o indirettamente, ascrivibili.

Lo studio condotto ha permesso di valutare sia l'influenza del contenuto di umidità della biomassa sulla pezzatura e sulla distribuzione granulometrica del cippato, sia di descrivere, attraverso un modello, il processo di disidratazione delle piante andanate nelle interfila in funzione del numero di giorni di permanenza in campo. Questi due aspetti rivestono una notevole importanza risultando tra i principali parametri da prendere in considerazione per definire la qualità della biomassa.

Il cantiere in due fasi nasce anche allo scopo di salvaguardare la risorsa suolo da processi di compattamento e destrutturazione. La sperimentazione condotta ha evidenziato il minor compattamento prodotto dal transito dell'abbattitrice andanatrice rispetto alle macchine tradizionali del cantiere in una fase.

Parole chiave: cedui a breve rotazione, impianto, raccolta, prototipi, stoccaggio, compattamento suolo.

Ringraziamenti

Questo Dottorato è stato svolto presso il Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura – Unità di ricerca per l'Ingegneria Agraria, nell'ambito dei progetti di ricerca Suscace, Faesi e Bioenergie finanziati dal Mipaaf.

Un sentito ringraziamento al mio co-tutor Dott. Luigi Pari per avermi messo a disposizione gli strumenti necessari per lo svolgimento delle attività scientifiche e sperimentali e al mio tutor Dott. Rodolfo Picchio per la disponibilità dimostrata e i suoi preziosi insegnamenti. Ringrazio, inoltre, il Sig. Aldo Spapperi, la sua famiglia, il personale aziendale e il mio collega Angelo del Giudice per i tanti momenti trascorsi insieme nel perseguimento di obiettivi comuni.

Un grazie di cuore, infine, a mia moglie e mio figlio Alessandro per il loro indispensabile sostegno affettivo

V. C.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	10
OBIETTIVI DEL PROGETTO	17
STATO DELL'ARTE	18
Meccanizzazione attualmente impiegata nell'impianto delle SRF di pioppo	19
Meccanizzazione attualmente impiegata nella raccolta delle SRF	22
Raccolta in una fase	25
Falciatrinciacaricatrice Spapperi RT	25
Claas Jaguar con testata da biomassa GBE-1	28
Pezzatrice LWF	30
Raccolta in due fasi	31
Taglio e accumulo a bordo campo: abbattitrice e accumulatrice ZPZ	31
Raccolta e cippatura in due fasi con stoccaggio nell'interfila: taglia allineatrice Mantovani e cippatrice Jordan RH 25 con testata pick up	35
Meccanizzazione attualmente impiegata nell'impianto delle MRF (medium Rotation Forestry) di pioppo	41
Meccanizzazione attualmente impiegata nella raccolta delle MRF (medium Rotation Forestry) di pioppo	42
SOLUZIONI TECNICHE E INNOVAZIONI PROPOSTE	47
MATERIALI E METODI	52
Sviluppo delle innovazioni	52
Rilievi in campo pre e post raccolta	52
Impianti a ciclo biennale	52
Impianti a ciclo quinquennale	53
Caratterizzazione del cippato prodotto	54
Massa volumica apparente - bulk density	54
Contenuto di umidità	55

Valutazione della pezzatura	56
Rilievo delle prestazioni delle macchine	57
Valutazione dei limiti operativi della macchina abbattitrice andanatrice CRA ING.....	58
Valutazione dei danni da compattamento prodotti in fase di raccolta	59
Valutazione del processo di disidratazione del pioppo andanato nell'interfila.....	61
Valutazione della pezzatura del cippato ottenuto in funzione del contenuto di umidità delle piante e del dispositivo cippatore.....	63
Calcolo dei costi di esercizio.....	64
Analisi statistica.....	69
Test T di Student.....	69
Analisi della varianza (ANOVA), Tukey test (HSD), regressioni e relativi assunti.....	69
Coefficiente di correlazione di Spearman	71
RISULTATI	73
Sviluppo di innovazioni tecnologiche dedicate alle piantagioni da biomassa a ciclo biennale .	73
Dispositivo automatico di alimentazione delle talee	73
Abbattitrice andanatrice per pioppo a ciclo biennale.....	75
Testata pick up per falciatrinciacaricatrice Spapperi modello RT.....	80
Sviluppo di innovazioni tecnologiche dedicate alle piantagioni da biomassa a ciclo quinquennale	81
Macchina trapiantatrice di astoni	81
Macchina abbattitrice andanatrice di pioppo quinquennale	86
Macchina semovente con testata pick up	89
Prove in campo, prestazioni e qualità del lavoro svolto dalle macchine sviluppate per le piantagioni di pioppo a ciclo biennale	93
Dispositivo automatico di alimentazione delle talee	93
Performance della trapiantatrice e qualità del lavoro svolto	94
Abbattitrice andanatrice per pioppo a ciclo biennale.....	96
Caratteristiche morfologiche e produttività degli impianti R2F2 e R4F2	96

Performance dell'abbattitrice andanatrice.....	97
Qualità del lavoro svolto	99
Trinciacaricatrice Spapperi RT equipaggiata con testata pick up	101
Performance della testata e qualità del lavoro svolto	101
Prove in campo, prestazioni e qualità del lavoro svolto dalle macchine dedicate alle piantagioni di pioppo a ciclo quinquennale	102
Macchina trapiantatrice di astoni	102
Performance della trapiantatrice e qualità del lavoro svolto	104
Abbattitrice andanatrice e cippatrice semovente per pioppo quinquennale	105
Caratteristiche morfologiche della piantagione e produttività	106
Operatività e qualità del lavoro svolto dalle macchine.....	107
Approfondimenti.....	112
Limiti operativi della macchina abbattitrice andanatrice per pioppo biennale.....	112
Prove di raccolta.....	113
Compattamento del suolo prodotto durante la raccolta delle Short Rotation Forestry	118
Caratteristiche delle macchine che partecipavano ai cantieri di raccolta	119
Caratteristiche del terreno.....	120
Resistenza alla penetrazione.....	120
Massa volumica apparente	124
Processo di disidratazione delle piante stoccate nell'interfila.....	128
Monitoraggio del processo di disidratazione delle piante stoccate in andana	129
Curva di disidratazione.....	132
Pezzatura del cippato prodotto in funzione del contenuto di umidità delle piante.....	135
Descrizione dei dispositivi di trinciatura	135
Risultati	136
Costi di esercizio delle macchine e dei cantieri	138
Trapiantatrice di talee Spapperi TP 200 – versione manuale e automatica CRA ING.....	138

Cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar	138
Cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT	139
Cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale - abbattitrici andanatrici.....	140
Cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale andanato - falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT con dispositivo pick up	141
Trapiantatrici di astoni manuale Alasia e semiautomatica CRA ING	142
Cantiere di abbattimento del pioppo quinquennale – abbattitrice andanatrice CRA ING ..	143
Cantiere di raccolta e cippatura del pioppo biennale e quinquennale con cippatrice semovente Spapperi	144
DISCUSSIONI.....	146
CONCLUSIONI.....	158
BIBLIOGRAFIA.....	163

INTRODUZIONE

L'attuale strategia europea di mitigazione delle emissioni di gas a effetto serra prevede un intenso utilizzo di biomasse legnose per fini energetici (Chum et al. 2001).

Il termine biomassa, nella sua accezione più generale, sta ad indicare ogni tipo di materiale che si origina dagli organismi viventi (in particolare dalla fotosintesi clorofilliana) e che non ha subito alcun processo di fossilizzazione. Le biomasse vegetali rientrano tra le fonti rinnovabili e a bilancio neutro poiché la CO₂ emessa per la produzione di energia non rappresenta un incremento di anidride carbonica nell'ambiente, ma è la medesima che le piante hanno assorbito per svilupparsi (Timmons e Mejía 2010). Tale risorsa è particolarmente adatta per la generazione di calore, elettricità, gas naturale (Aebiom 2011) e può offrire un significativo contributo in termini ambientali, di benessere sociale e sviluppo locale.

L'Italia, più di altri paesi, risente della dipendenza dal petrolio a causa del prezzo attuale dell'energia elettrica e dell'aumento del prezzo del greggio. La politica energetica si basa sul sostegno e sull'utilizzo diversificato delle fonti energetiche e numerosi paesi sostengono il maggiore impiego di energia da fonti rinnovabili attraverso sovvenzioni, esenzioni fiscali e altri incentivi (Stupak et al. 2007). Di qui la necessità di accompagnare la crescente domanda di combustibili con un adeguato aumento dell'offerta, al fine di garantire la stabilità dei prezzi (Hillring 1997), aspetto, quest'ultimo, fondamentale per lo sviluppo del settore (Junginger et al. 2006). Gli anni 90 sono stati quelli di maggiore presa di coscienza del rapporto energia ambiente, dalla conferenza mondiale sull'ambiente di Rio de Janeiro (1992) all'adozione del protocollo di Kyoto (1997). Quest'ultimo impegnava i paesi industrializzati e quelli ad economia di transizione a ridurre, entro il 2008-2012, del 5,2% le emissioni di gas ad effetto serra rispetto ai livelli del 1990. L'Italia ha ratificato il protocollo di Kyoto con la legge 120/2002, accettando la responsabilità del raggiungimento dell'obiettivo di riduzione di emissioni dei gas serra per una quota corrispondente al 6,5% delle emissioni del 1990. Da allora in poi diversi documenti di programmazione, comunitari e nazionali, hanno evidenziato l'importanza e le opportunità offerte dalle filiere bioenergetiche, stimolando e dando impulso allo sviluppo delle colture dedicate. Il decreto Bersani, ad esempio, ha imposto ai produttori di energia da fonti tradizionali di immettere in rete, a partire dal 2002, il 2% di energia prodotta da fonti rinnovabili. Nel 2001 il parlamento Europeo ha emanato la direttiva

2001/77/CE (recepita in Italia con DL 387/2003) per promuovere maggiormente la riforma della PAC. Tale riforma, svincolando il sostegno al reddito dalla produzione agricola, ha dato un nuovo impulso allo sviluppo delle colture energetiche con il risultato di aumentarne le superfici coltivate (Council of the European Union 2003). Il parlamento Europeo, nel 2008, ha approvato il pacchetto clima energia (20-20-20 del 2020) che prevede di aumentare del 20% l'efficienza energetica, di ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 e produrre il 20% dell'energia da fonti alternative (ITABIA 2008). Anche nel documento di programmazione economico finanziaria 2007 - 2011 viene considerato prioritario favorire la crescita della filiera agro energetica. Il documento prevede, ad esempio, la riduzione dell'aliquota Iva al 10% per le forniture di energia da fonti rinnovabili e la revisione dei certificati verdi.

Una concreta opportunità di sviluppo della filiera legno energia è offerta dal processo di riconversione del settore bieticolo saccarifero a seguito della riforma OCM zucchero del 2006. Una delle principali società coinvolte, Power Crop (ex Sadam Eridania) prevede la realizzazione di diverse centrali termoelettriche alimentate con biomasse lignocellulosiche. In Emilia Romagna, in particolare, è prevista la realizzazione di una centrale da 25 MWe alimentata con le biomasse prodotte da 7000 ha di piantagioni a turno biennale, ricadenti in un bacino di 70 km di raggio dalla centrale (filiera corta). Questa esperienza potrebbe contribuire a cambiare significativamente lo scenario nazionale delle biomasse ad uso energetico.

Tra le biomasse di origine agricola e forestale, secondo quanto previsto nel D.P.C.M. 8 marzo 2002¹ e stando alla definizione di biomassa contenuta nella Direttiva 2009/28/CE (promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili), possiamo annoverare i seguenti materiali:

- residui delle potature di frutteti, vigneti, oliveti;
- deiezioni degli allevamenti zootecnici;
- residui agricoli e agroindustriali (paglia, sansa di oliva, vinacce, buccette, gusci di frutta secca, stocchi di mais, lolla di riso);
- potature delle alberature cittadine e dei parchi;
- coltivazioni dedicate;

¹ Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione

- residui e sottoprodotti derivanti dalle operazioni di manutenzione dei boschi e di arboreti da legno;
- residui della lavorazione del legno (cortecce, sfridi, segature, trucioli).

La raccolta e l'utilizzo per fini energetici delle potature di frutteti (2-4 t/ha/anno), vigneti e oliveti (1-2 t/ha/anno) permette di valorizzare un sottoprodotto che nella maggior parte dei casi rappresenta un costo per l'agricoltore. Generalmente il materiale viene bruciato direttamente in campo oppure impiegato per l'alimentazione di stufe o camini a basso rendimento energetico. Un impiego razionale, invece, ne consentirebbe il recupero sostenibile in termini ambientali, agronomici ed economici.

L'auto consumo consente di mantenere in azienda tutto il valore aggiunto contenuto nel prodotto energetico ed il livello di meccanizzazione oggi presente sul mercato è tale da consentirne la raccolta a costi ridotti (raccoltrinciasarmenti, pressa raccogliatrici e varie tipologie di imballatrici). Un'ulteriore considerazione riguarda gli espianti a fine ciclo, che possono rappresentare, per un'azienda di medie e grandi dimensioni, una fonte di biomassa considerevole e molto superiore a quella ottenibile dalle sole potature.

Le potature delle alberature cittadine e dei parchi sono spesso considerate un rifiuto da smaltire in discarica. La logica imporrebbe di impiegare questa risorsa come fonte di energia, anche in virtù del fatto che tali residui sono disponibili nel periodo in cui si scaldano gli ambienti e l'utilizzo in caldaia ne eviterebbe lo smaltimento. Non vi sono inoltre costi di esbosco in quanto il prodotto si trova in zone facilmente accessibili e verrebbe comunque cippato per ridurre il volume di trasporto. Ad ogni modo vanno considerati anche altri aspetti, quali l'accumulo di inquinanti e i processi di volatilizzazione di queste sostanze durante la combustione.

Tra le biomasse forestali possiamo considerare i cimali e le ramaglie, quali scarti delle utilizzazioni forestali convenzionali (20-25% del volume totale sopraterra) e le piante di scarso valore derivanti dal primo diradamento delle piantagioni di conifere, oltre al materiale derivante dalla ripulitura degli alvei fluviali (Spinelli e Verani 2000). Il basso valore unitario del prodotto impone la scelta di una meccanizzazione adeguata, il cui livello è in funzione di diversi fattori: caratteristiche del popolamento, pendenza, accidentalità, accessibilità, intensità di taglio, dimensione del legname utilizzato. Nei diradamenti delle piantagioni di conifere può essere ammesso l'uso di una meccanizzazione spinta, da teste di abbattimento abbinate a trattrici, escavatori o pale meccaniche a trattori forestali articolati per l'esbosco (muniti di pinza posteriore). Nel

bosco ceduo è molto più consueto l'uso delle motoseghe mentre per l'esbosco si possono impiegare trattori con gabbie o il verricello per il concentramento dei carichi in prossimità delle piste.

Le piantagioni dedicate, soprattutto a causa della contrazione del comparto agricolo e dell'incertezza del mercato (crollo dei prezzi dei cereali), stanno svolgendo un ruolo di primo piano nell'ambito delle fonti rinnovabili. Tali piantagioni possono essere suddivise in colture oleaginose (soia, girasole, brassicacee), zuccherine (sorgo zuccherino, barbabietola da zucchero, topinambur), amidacee (cereali, mais, patate) e lignocellulosiche.

A seconda delle caratteristiche chimico fisiche le biomasse possono essere convertite, mediante processi biochimici o termochimici, in combustibili solidi, liquidi e gassosi. I processi di conversione più comuni sono la combustione diretta, la carbonizzazione, la pirolisi, la gassificazione, la digestione anaerobica, la fermentazione alcolica e l'estrazione di olii. Così, ad esempio, la legna, il cippato e il pellets possono essere utilizzati in impianti di combustione ad alto rendimento per la produzione di calore, per la cogenerazione o la trigenerazione. Dalla fermentazione di vegetali ricchi di zuccheri (canna da zucchero, barbabietole, mais ecc.) si può ricavare etanolo quale combustibile per motori endotermici, dalle oleaginose si ottiene biodiesel mentre dalla digestione o fermentazione anaerobica si ottiene biogas.

Le colture lignocellulosiche possono essere erbacee, sia annuali (sorgo da fibra) che perenni (canna comune, miscanto), oppure arboree a turno breve o medio.

Le Short Rotation Woody Crops rappresentano un'importante fonte di energia rinnovabile (Hansen 1991) e una possibile alternativa ai combustibili fossili in Europa (Bergante et al. 2010). Le caratteristiche di questo modello colturale sono tali da consentire una strutturazione ed una pianificazione dettagliata della filiera, dalla fase di impianto alla logistica della raccolta, dallo stoccaggio alla conversione energetica.

Le principali specie utilizzabili in Italia sono il pioppo (*Populus* spp.), la robinia (*Robinia pseudoacacia* L.), l'eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e il salice (*Salix cinerea* L., *Salix alba* L.). Ciascuna coltura si adatta a determinate caratteristiche pedo-climatiche (Paris et al. 2011; ITABIA 1999). Il nostro paese viene considerato ottimale per la crescita del pioppo (Dillen et al. 2007) che risulta essere, difatti, la specie maggiormente diffusa. Questa coltura, con particolare riferimento ai nuovi cloni ed alle nuove cultivar da biomassa,

evidenzia livelli di produttività molto interessanti (Paris et al. 2011), mantenendo una buona resa per molti anni (Makeschin 1999).

Nel Nord Italia, ad esempio, la produttività media annua ottenuta dal miglior clone è leggermente inferiore alle 17,5 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ (Bergante et al. 2010) tuttavia, una documentata variabilità è stata accertata in diversi studi condotti all'estero (Dickmann and Stuart 1983; Dillen et al. 2007; Ceulemans and Deraedt 1999) e in Italia (Facciotto et al. 2005; Mareschi et al. 2005), con rendimenti compresi tra 3 - 4 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ e 15-20 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹.

Negli ultimi anni adeguati incentivi regionali hanno contribuito significativamente ad incrementare le superfici interessate dalle SRC che si sono diffuse dal nord (Lombardia in particolare) alle regioni centrali (Umbria, Emilia Romagna, Toscana, Marche, Abruzzo, Lazio) (Salvati et al. 2007).

Il mercato delle bioenergie è in continua espansione e, ad oggi, la richiesta di prodotti derivati dalla coltivazione del pioppo, sia per scopi energetici sia per l'industria di trasformazione, è notevolmente superiore a quella che il mercato nazionale è in grado di offrire (Castro et al. 2006).

Il ruolo della ricerca nel settore della meccanizzazione agricola è quello di individuare e sviluppare soluzioni e innovazioni tecnologiche con un approccio scientifico. La realizzazione di una nuova macchina prevede una prima fase progettuale, che prende in considerazione le caratteristiche della coltura da impiantare o raccogliere, le necessità degli utenti, la scelta dei materiali, le tecniche costruttive e, una seconda fase prototipale, durante la quale l'innovazione viene sottoposta ad un'intensa attività sperimentale volta a monitorarne il funzionamento, a identificarne i punti deboli e le migliorie da apportare. Alla fine di questo percorso saranno state definite le caratteristiche meccaniche e la configurazione che la macchina commerciale potrà avere.

Lo sviluppo di una nuova macchina trova giustificazione nel momento in cui viene soddisfatto almeno uno dei seguenti requisiti: incremento della capacità operativa, miglioramento della qualità del lavoro o delle caratteristiche del prodotto ottenuto, diminuzione del costo di produzione (in termini energetici e/o economici), riduzione della fatica e/o degli infortuni, riduzione dell'impatto ambientale.

La meccanizzazione della raccolta viene considerata una delle fasi più importanti del processo produttivo (Christopherson e Mattson 1990). L'investimento su una determinata

coltura è legato alla redditività che se ne può ricavare e il ricorso ad una meccanizzazione funzionale ed efficiente consente di contenere i costi di produzione complessivi.

L'ottenimento di materiale adatto per la produzione di energia è un processo complesso e richiede una regolazione accurata di molti parametri. L'introduzione di innovazioni di processo comporta la valutazione del loro impatto sulle caratteristiche qualitative del prodotto e la definizione delle corrette condizioni per la sua produzione.

I parametri principali da prendere in considerazione per definire la qualità della biomassa sono il contenuto di umidità (Pettersson and Nordfjell 2007; Nurmi and Hillebrand 2007) e la distribuzione dimensionale dei chips (Hartmann et al. 2006; Paulrud and Nilsson 2004; Suadicane and Gamborg 1999). Questi parametri sono in grado di influenzare aspetti importanti quali il valore calorico (Wu et al. 2011), il comportamento in fase di stoccaggio e il trattamento finale all'impianto di trasformazione (Nati et al. 2010; Spinelli et al. 2012).

Uno dei principali problemi relativi allo stoccaggio riguarda l'elevato contenuto di umidità del prodotto al momento della raccolta (Kauter et al. 2003), compreso tra il 50% e il 60% su base umida (Mitchel 1995). In queste condizioni sarebbe preferibile procedere alla sua combustione entro pochi giorni dalla raccolta (Mitchel et al. 1999), anche se in molti casi tale materiale deve essere conservato per diversi mesi (Kristensen et al. 2003) con inevitabili perdite di sostanza secca (Culshaw et al. 1999; Raida 2005).

Diminuendo il contenuto di umidità iniziale è possibile aumentare i rendimenti degli impianti (Brammer and Bridgwater 2002; Röser et al. 2011), riducendo al contempo il costo energetico di vaporizzazione dell'acqua (Liang et al. 1996) e l'emissione di inquinanti (Nord - Larsen et al. 2011).

La biomassa legnosa può essere stoccata in forma di cippato o di piante intere (Bedane et al. 2011), coinvolgendo due gradienti di umidità: il primo, dagli strati interni verso la superficie esterna del cumulo; il secondo, dalla superficie della biomassa legnosa all'aria circostante e viceversa, in funzione del diverso gradiente di umidità tra biomassa e aria (Bedane et al. 2011).

Lo stoccaggio dei fusti interi risulta maggiormente idoneo quando intercorre un periodo di tempo lungo tra l'abbattimento e l'utilizzo in caldaia (Mitchel et al. 1999; Nurmi 1995). Durante questo periodo le piante vanno incontro ad un processo di disidratazione naturale che può portare a valori di umidità inferiori al 30% (Mitchel 1995; Culshaw and

Stokes 1995). In tali condizioni l'attività microbica si riduce e, di conseguenza, anche la perdita di sostanza secca (Jirjis et al. 1995; Gigler et al. 2000). Il tasso di essiccazione dipende da diversi fattori quali la temperatura, l'umidità relativa, la velocità del vento, la stagione, le precipitazioni, la specie e le dimensioni dell'albero (Andersson et al. 2002).

La pezzatura del cippato dipende, invece, dal tipo di macchina, dal dispositivo di sminuzzamento, dalla condizione degli utensili (Spinelli et al. 2012), dalla frizione che viene a formarsi tra il legno e la superficie di taglio del coltello (Abdallah et al. 2011) e dall'umidità del legno (McKenzie and Karpovich 1968). Maggiore sarà il valore di quest'ultima, più sottile sarà il cippato prodotto (McKenzie 1960). Prove di cippatura condotte su abete rosso (*Picea abies* L. Karst) hanno evidenziato, a parità di principio di cippatura e affilatura dei coltelli, l'ottenimento di una differente distribuzione dimensionale del cippato in funzione del diverso contenuto di umidità del materiale di partenza (fresco ed essiccato) (Suadicane and Gamborg 1999).

Un ultimo aspetto da prendere in considerazione riguarda l'impatto prodotto sul suolo dal transito delle macchine coinvolte nei cantieri di raccolta.

Il suolo è stato definito dalla Carta Europea dei Suoli (Consiglio d'Europa, 1972) uno dei beni più preziosi dell'umanità e il compattamento risulta essere uno degli aspetti principali della sua degradazione. Secondo dati recenti della Comunità Europea e dell'ECAF (Federazione Europea per l'Agricoltura Conservativa) il 36% dei suoli è sottoposto a gravi processi di compattazione (Doldi 2009).

La compattazione può essere definita come la compressione della massa del suolo in un volume minore che si accompagna a cambiamenti significativi nelle proprietà strutturali e nel comportamento del suolo, nella conduttività idraulica e termica, nell'equilibrio e nelle caratteristiche delle fasi liquide e gassose dello stesso (Arpa Piemonte 2001).

La raccolta delle Short Rotation Forestry viene eseguita da metà novembre a metà marzo e tale periodo si caratterizza, spesso, per le intense precipitazioni che rendono impraticabili i campi per diverse settimane.

La necessità di raccogliere il prodotto prima della ripresa vegetativa, tuttavia, impone di operare la raccolta anche in condizioni non ottimali, causando inevitabili problemi di compattamento e destrutturazione del suolo stesso.

OBIETTIVI DEL PROGETTO

Il progetto prevedeva il raggiungimento di diversi obiettivi tra loro interdipendenti. La prima fase è stata incentrata nella ricerca e nello studio della meccanizzazione impiegata nelle fasi di impianto e raccolta delle SRF (Short Rotation Forestry) e delle MRF (Medium Rotation Forestry). Lo studio condotto ha messo in evidenza una serie di limitazioni di carattere tecnico, operativo e funzionale e ciò ha permesso di definire quali potessero essere le innovazioni tecnologiche in grado di migliorare uno o più aspetti legati alla filiera agro energetica. E' stata quindi seguita la fase di progettazione e sviluppo delle nuove soluzioni meccaniche proposte, provvedendo a individuare e descriverne dettagliatamente le caratteristiche.

Sono state successivamente condotte una serie di prove sperimentali volte a valutare le capacità operative, la qualità del lavoro svolto (perdita di prodotto, danni alle ceppaie, regolarità di trapianto, ingolfamenti, regolarità di deposizione delle piante abbattute ecc.) e, nel caso delle cippatrici, anche la qualità e le caratteristiche del cippato ottenuto (contenuto di umidità, massa volumica apparente, distribuzione granulometrica).

L'introduzione di innovazioni di processo comporta anche un'attenta analisi dei limiti operativi e del campo di applicabilità delle nuove soluzioni proposte, oltre alla valutazione del loro impatto sulla qualità del prodotto ottenibile e sugli effetti ambientali ad essi direttamente, o indirettamente, ascrivibili. Per tali ragioni sono stati condotti ulteriori studi volti a identificare:

- i limiti operativi della macchina abbattitrice andanatrice per la raccolta in due fasi del pioppo biennale;
- il processo di disidratazione del pioppo intero stoccato nell'interfila in funzione del numero di giorni di permanenza in campo;
- l'influenza del diverso contenuto di umidità delle piante sulla pezzatura delle scaglie;
- il compattamento del terreno prodotto dal transito delle macchine durante la raccolta in un singolo passaggio e in due fasi distinte.

L'ultima parte della tesi è stata incentrata sulla valutazione dei costi di esercizio delle diverse macchine operatrici oggetto di studio e sull'analisi dei benefici economici ed operativi riconducibili alle innovazioni proposte.

STATO DELL'ARTE

Le specie comunemente impiegate per la costituzione di piantagioni arboree allevate a SRF sono la robinia, l'eucalipto e il pioppo. Ciascuna coltura si adatta a determinate caratteristiche pedoclimatiche con costi, densità e materiale di impianto differenti.

La robinia e l'eucalipto vengono impiantati, generalmente, con una densità di circa 5100 p/ha, utilizzando rispettivamente piantine di un anno a radice nuda e semenzali di 3-4 mesi in fitocelle.

Il pioppo è la coltura maggiormente impiegata per la costituzione di piantagioni energetiche, con densità differenti a seconda del turno di ceduzione (annuale, biennale, quinquennale).

Gli impianti annuali e biennali vengono realizzati con talee di 20 – 22 cm, gli impianti quinquennali, invece, possono essere realizzati anche con astoni di 180 – 200 cm.

Il turno annuale, caratterizzato da densità maggiori di 10000 p/ha, derivava dal modello svedese ed è stato utilizzato in Italia a partire dagli anni 90. Le testate disponibili per la raccolta erano in grado di operare su piante con diametro massimo di 6 cm (prime testate Claas HS-1 e HS-2).

A partire dal 2005 sono state invece sviluppate macchine e testate in grado di operare su diametri fino a 15 cm (falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT, testata GBE-1 per falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar). Ciò ha permesso di allungare il turno di ceduzione (da uno a due anni) e di ridurre le densità ad ettaro, favorendo l'accrescimento delle piante e l'ottenimento di un prodotto qualitativamente superiore.

La tendenza attuale è quella di adottare sesti di impianto 3 x 0,50 m (6667 p/ha) e 3,50 x 0,50 m (5714 p/ha) in funzione della tipologia di raccolta programmata (una fase o due fasi). I moduli a file binate sono stati quasi completamente abbandonati, a causa delle problematiche rilevate durante la raccolta (eccessivo quantitativo di biomassa per metro lineare) e per le difficoltà nel controllare le infestanti all'interno delle bine.

Una fetta del mercato è orientata, invece, verso gli impianti a ciclo quinquennale. Questa tipologia di piantagione si caratterizza per la buona flessibilità gestionale e per la buona

qualità del cippato prodotto. È infatti possibile anticipare o posticipare la raccolta di un anno senza dover stravolgere la tecnologia impiegata, effettuare una produzione mista di tondelli (uso cartiera o sfogliatura) e cippato di qualità da destinare all'industria dei pannelli di fibre e trucioli o alle centrali energetiche a biomassa, diversificando la produzione in base alle richieste del mercato del legno (Bergante e Facciotto 2006).

La coltura viene impiantata con un sesto di 3 x 2 m e le piante possono raggiungere, al quinto anno di vegetazione, un diametro basale di 200-220 mm, un'altezza massima di 16 m ed un peso unitario di circa 120-150 kg.

Meccanizzazione attualmente impiegata nell'impianto delle SRF di pioppo

Esistono diverse macchine per l'impianto del pioppo a ciclo biennale, sia commerciali che prototipali. Alcune di esse sono state appositamente sviluppate per l'impianto del pioppo e, pertanto, possono operare esclusivamente con talee di determinate dimensioni. Altre, invece, possono operare con materiale vegetale di diversa natura (talee, piantine a radice nuda, con pane di terra).

Le macchine più semplici provvedono alla sola apertura e chiusura del solco nel terreno, richiedendo l'inserimento manuale della talea, altre, invece, prevedono l'interramento meccanico, previa alimentazione degli appositi dispositivi.

Le trapiantatrici oggi disponibili sul mercato sono le seguenti:

- trapiantatrice Spapperi TTP/2
- trapiantatrice Berto;
- trapiantatrice Allasia T1;
- trapiantatrice Oliver;
- trapiantatrice Rotor;
- trapiantatrice Quick wood;
- trapiantatrice Step Planter Salix Maskiner AB;
- pianta a stoni orizzontale Deiafa.

Le operatrici, semiportate posteriormente da una trattrice, sono dotate di sedili per l'alloggiamento dell'operatore (o degli operatori) e di dispositivi per il contenimento del materiale di propagazione. La tipologia, la posizione degli organi di trapianto, le modalità di alimentazione e le caratteristiche del materiale utilizzato (astoni e talee) variano a seconda del modello.

- La Trapiantatrice Spapperi TTP/2 risulta composta da un rullo anteriore per il compattamento del terreno e una ruota metallica equipaggiata radialmente con otto pinzette ed altrettanti elementi iniettori. Le talee, inserite nelle apposite pinzette, vengono rilasciate nel terreno durante la fase di avanzamento, grazie all'azione di un martinetto idraulico che agisce sull'elemento iniettore (Pari e Fedrizzi 2004).
- La trapiantatrice Berto risulta costituita da una ruota con pinze disposte radialmente. Quest'ultime rilasciano le talee all'interno di un solco aperto precedentemente da un assolcatore e richiuso da appositi rulli rinalzatori (Manzone et al.2006; Balsari et al. 2002).
- La trapiantatrice Allasia T1 è composta da un rullo per il compattamento del terreno e una ruota d'acciaio su cui sono posizionati gli organi di trapianto (Manzone et al.2006). Questi ultimi sono costituiti da coppie di tubolari di diversa sezione (il tubolare di sezione inferiore scorre all'interno di quello di sezione maggiore) all'interno dei quali vengono collocate le talee. Quando i tubolari si trovano in prossimità del terreno una molla spinge il tubolare interno favorendo l'inserimento della talea nel terreno.
- La trapiantatrice Oliver è costituita da un assolcatore, da lame rinalzatrici, da un rullo compattatore e dall'organo di trapianto (Manzone et al.2006). Quest'ultimo risulta composto da una catena con pinze azionata dal contatto di due ruote gommate col terreno.
- L'elemento principale della trapiantatrice Rotor consiste in un cingolo metallico di maglie d'acciaio. All'esterno del cingolo è montato un pattino mentre al suo interno è collocato un cilindro nel quale scorre un pistone. L'operatore inserisce la talea nel cilindro nel momento in cui viene a trovarsi nella parte superiore del cingolo. Quando il pattino viene a trovarsi nella parte inferiore, il pistone si sposta verso il basso (grazie all'azione di un piano inclinato) inserendo la talea nel terreno (Pari e Fedrizzi 2004).

- La Trapiantatrice Quick wood si compone di un telaio in metallo dove sono fissati in sequenza l'assolcatore, la pinza di trattenimento della talea e una coppia di ruotini. Questi ultimi svolgono la duplice funzione di regolare la profondità di lavoro e comprimere il terreno ai lati della talea (Pari e Fedrizzi 2004). L'elemento interruttore viene azionato idraulicamente, per mezzo di un consenso a pedale controllato dall'operatore che deve, nello stesso tempo, inserire la talea nella pinza (Manzone et al.2006).
- La trapiantatrice Step Planter Salix Maskiner AB, prodotta da una ditta svedese per l'impianto del salice, effettua sia la suddivisione degli astoni in talee che la loro deposizione verticale nel terreno. La macchina risulta costituita da due unità azionate tramite una trasmissione meccanica e prevede l'inserimento manuale degli astoni tra due cinghie che provvedono a guidare il materiale verso uno stivaletto di trapianto. (Pari e Fedrizzi 2004).
- La Pianta astoni orizzontale Deiafa, progettata e realizzata dalla Sezione di Meccanica dell'Università di Torino, prevede la deposizione automatica di astoni, in posizione orizzontale, all'interno di solchi successivamente richiusi da appositi versoi. La fase di deposizione viene effettuata con l'ausilio di nastri trasportatori azionati da catene collegate ad una coppia di ruotini (Manzone et al.2006).

Ciascuna delle macchine sopra descritte presenta aspetti più o meno positivi riconducibili alla qualità del lavoro svolto e all'operatività registrata in campo. La trapiantatrice Salix Maskiner AB, ad esempio, pur evidenziando un'elevata capacità di lavoro, presenta alcune problematiche legate al dimensionamento delle talee e alla loro rottura durante la fase di interrimento (Balsari et al. 2002). La trapiantatrice Spapperi, invece, essendo priva di organi assolcatori trova limiti su terreni non ben lavorati.

In tabella 1 vengono riportate le prestazioni rilevate da uno studio condotto dal Dipartimento di Economia e Ingegneria Agraria Forestale e Ambientale dell'Università degli studi di Torino (Manzone et al. 2006).

Tabella 1 – Caratteristiche tecniche ed operatività delle trapiantatrici (modificato da Manzone et al.).

	TRAPIANTATRICE							
	Spapperi TTP/2	Berto	Allasia T1	Oliver	Rotor	Quick wood	Salix Maskiner	Deiafa
Materiale	Talee	Talee	Talee	Talee	Talee	Talee	Astoni	Astoni
N.° file	2	1	1	2	1	1	2	2
ha/h	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	-	1,4	1,1
N° talee/ora	4020	4020	4020	4020	3350	-	9380	-

Le macchine hanno fatto registrare capacità di lavoro comprese tra 0,50 e 0,60 ha/h per le trapiantatrici di talee, e superiori a 1 ha/h per le macchine che impiegano astoni.

Meccanizzazione attualmente impiegata nella raccolta delle SRF

La raccolta delle SRF può avvenire in un singolo passaggio, con taglio e cippatura nello stesso momento, oppure in due fasi, con taglio e cippatura in due momenti distinti (Mitchell et al. 1999; Mitchell 1995).

La raccolta in una fase, generalmente, viene eseguita con raccoglitrice da foraggio di grandi dimensioni, adattate alle SRF con apposite testate (Spinelli et al. 2009). Queste macchine presentano rendimenti elevati e possono essere mutate su altre colture in diversi periodi dell'anno. Il cippato prodotto con la raccolta in una fase si caratterizza per un elevato contenuto di umidità (circa il 55-60%) e ciò comporta inevitabili processi di fermentazione e perdita di sostanza secca durante lo stoccaggio. La finestra di raccolta, inoltre, risulta piuttosto limitata (da metà novembre a metà marzo) e inverni particolarmente piovosi possono ridurre il numero di giorni di praticabilità dei campi, con ripercussioni negative sul piano logistico, economico, gestionale e ambientale.

Spesso, infatti, proprio a causa del limitato periodo utile per la raccolta si è costretti ad operare su terreni con bassa portanza, causando gravi danni da compattamento (foto 1 e 2).

La raccolta in due fasi, invece, può essere eseguita secondo due differenti metodologie:

- abbattimento e accatastamento a bordo campo (Pari 1999), per una successiva cippatura per opera di cippatrici, fisse o semoventi, alimentate da un braccio idraulico con pinza;
- abbattimento e andatura tra le file, per una successiva cippatura per opera di cippatrici semoventi auto alimentate tramite dispositivi pick up.



Foto 1 – Danni da compattamento prodotti dal transito di una trattrice con rimorchio carico di cippato.



Foto 2 – Carreggiata prodotta dal transito di un rimorchio con pneumatici a sezione ridotta.

Il cantiere in due fasi con stoccaggio a bordo campo consente di stoccare la biomassa nelle capezzagne di testa, provvedendo alla cippatura in funzione delle richieste energetiche della centrale. Il conferimento del prodotto, in questo caso, può avvenire durante l'intero arco dell'anno. Le piante intere, rispetto al cippato, risentono in misura minore dei processi biologici di degradazione, andando incontro ad un naturale processo di disidratazione. Ciò consente di ottenere, nella successiva fase di cippatura, un prodotto più stabile e meno soggetto a processi fermentativi.

La cippatura a bordo campo può essere eseguita con macchine caratterizzate da elevate produttività e costi di esercizio orari inferiori a quelli delle trinciatrici da foraggio.

Tale sistema impone, di contro, il passaggio di una macchina in più, la disponibilità di ampie superfici (non sempre disponibili) e la necessità di movimentare le piante abbattute dal letto di caduta alle capezzagne.

Il cantiere in due fasi con stoccaggio nell'interfila, oltre ad offrire benefici in parte assimilabili a quelli sopra descritti, consente di migliorare la gestione di alcuni aspetti "negativi" insiti nella metodologia che prevede l'accumulo del prodotto a bordo campo. Lo stoccaggio, avvenendo nell'interfila, non richiede la disponibilità di ampie capezzagne e il prodotto stoccato non necessita di essere movimentato prima della cippatura in quanto

L'impiego di testate pick up consente di raccogliere il prodotto direttamente nell'interfila. La cippatura, inoltre, può avvenire con falciatrinciacaricatrici in grado di operare sia su prodotto andanato, sia su piante in piedi (modificando la parte frontale della testata).

L'abbattimento viene effettuato con abbattitrici andanatrici leggere, che garantiscono l'esecuzione delle operazioni di abbattimento anche in inverni piovosi. Il passaggio dei mezzi pesanti (trinciatrici e trattori carichi di cippato) avviene, invece, tra la fine di aprile e i primi di giugno, periodo questo che garantisce, in linea di massima, condizioni ambientali più favorevoli al transito delle macchine.

Di contro occorre considerare che tale metodologia richiede un'interfila di almeno 3,50 m (minore densità di piante ad ettaro), il passaggio di una macchina in più rispetto alla raccolta in una fase e, un periodo utile per il conferimento del prodotto inferiore a quanto possibile con lo stoccaggio a bordo campo.

Raccolta in una fase

Falciatrinciacaricatrice Spapperi RT

La falciatrinciacaricatrice Spapperi RT è una macchina semiportata posteriormente da una trattore della potenza minima di 150 kW, dotata di guida reversibile. È composta da un apparato di trinciatura e da una testata di raccolta (foto 3). La testata è in grado di operare su piante con diametro massimo di 180 - 200 mm e rappresenta una valida alternativa alle falciatrinciacaricatrici semoventi nel caso in cui sia necessario operare in presenza di superfici produttive particolarmente frammentate sul territorio. L'operatrice si compone di un apparato di taglio, un sistema abbattitore e di dispositivi di convogliamento, alimentazione e cippatura.

Il sistema abbattitore è costituito da una coclea rotante ad asse orizzontale (alimentata idraulicamente) che spinge in avanti le piante traslandone la parte apicale verso l'esterno della fila. Le piante, una volta tagliate, cadono a terra orientate verso l'interfila per essere successivamente intercettate dall'apparato di convogliamento e alimentazione.

L'apparato di taglio si compone di due dischi del diametro di 650 mm ciascuno (spessore di 6 mm) che operano a 2000-2200 giri/min.

Il dispositivo di convogliamento si compone di due alberi verticali muniti di 4 serie sfalsate di doppi martelli flottanti.

Il dispositivo di alimentazione è costituito da due rulli dentati controrotanti orizzontali, del diametro e lunghezza pari rispettivamente a 270 mm e 350 mm, azionati da due motori idraulici indipendenti. Il rullo superiore è a posizionamento variabile, in funzione della dimensione del prodotto in entrata. In caso di ingolfamento è possibile svuotare il canale di alimentazione invertendo il senso di rotazione dei rulli.

L'apparato trinciante è costituito da un disco di 1200 mm di diametro, ruotante attorno ad un asse orizzontale, con due coltelli radiali che effettuano il taglio del prodotto agendo su un controcoltello fisso. La rotazione del disco, grazie alla presenza di apposite palette, genera un flusso centrifugo di aria che permette lo scarico del prodotto trinciato attraverso un tubo di lancio.

Il cantiere di raccolta (foto 4) ottimale risulta rappresentato dalla trattrice da abbinare alla falciatrinciacaricatrice e da due trattrici con rimorchi da almeno 20 m³.

L'operatività della macchina è stata testata nel corso di una prova sperimentale svoltasi in Savigliano (CN) su un impianto di pioppo R2F2 da circa 50 t/ha. La macchina ha fatto registrare una capacità di lavoro operativa di 0,55 ha/h e una produzione oraria operativa di 28,80 t/h (Pari e Civitarese 2009).



Foto 3 – Testata Spapperi RT per la raccolta del pioppo biennale in piedi.



Foto 4 – Falcitrinciacaricatrice Spapperi mod. RT in raccolta di pioppo.

Claas Jaguar con testata da biomassa GBE-1

La Claas Jaguar è una falciatrinciacaricatrice agricola semovente commercializzata con diverse classi di potenza. La serie 890, ad esempio, ha una massa di 11560 kg ed è azionata da un motore diesel Daimler Chrysler di 16 litri a 8 cilindri che eroga una potenza massima di 372 kW. Nella raccolta delle SRF la semovente può essere abbinata alla testata GBE-1, nata dalla collaborazione tra l'azienda di contoterzisti Veneta Mais e la Società Biomasse Europa.

La testata (foto 5) ha una massa di 1950 kg, un ingombro esterno di 2800 mm di larghezza e 2000 mm di lunghezza e si compone di un telaio abbattitore e di una serie di dispositivi di taglio, convogliamento e alimentazione.



Foto 5 – Testata da biomassa GBE-1 per Claas Jaguar.

Il telaio abbattitore ha una forma a Y e svolge la funzione di spingere le piante in avanti di circa 25° prima del taglio.

Il dispositivo di taglio è costituito da due lame circolari del diametro e spessore pari, rispettivamente, a 800 mm e 7 mm, con 80 denti profondi 10 mm, distanziati tra loro di

31,5 mm. Il regime di rotazione delle lame è di 1700 giri/min. L'altezza di taglio può essere regolata idraulicamente da un minimo di 50 mm ad un massimo di 320 mm.

Il sistema di convogliamento è costituito da una coppia di alimentatori rotanti a stella, posizionati sopra le lame di taglio. Ciascuno di essi monta 8 “dita” della lunghezza di 205 mm, leggermente coniche, tenuti in posizione da un sistema a molla che controlla la loro disarticolazione in relazione alla resistenza offerta dalle piante durante la fase di convogliamento.

I fusti vengono successivamente intercettati dal gruppo di alimentazione, costituito da 3 rulli con lame a coltello, due nella parte inferiore e uno nella parte superiore.

La macchina è dotata anche di un dispositivo rilevatore di metalli e di un inversore. Il primo, agendo tramite una frizione di disinnesto, provoca l'immediato blocco del sistema in caso di immissione di corpi estranei metallici; il secondo, invece, permette di liberare il canale di alimentazione da eventuali ingolfamenti agendo sul verso di rotazione dei rulli.

A ridosso del gruppo di alimentazione, sotto la cabina di guida, è posto l'apparato trinciante, in grado di operare su piante con diametro massimo di 150 mm.

Il tamburo di serie ruota a 1200 giri/min e può ospitare un numero massimo di 24 coltelli su due file sfalsate (modelli di recente costruzione offrono anche soluzioni con 36 coltelli). Durante la raccolta delle biomasse vengono montati solo 12 coltelli, 6 per fila.

Una volta cippato, il materiale viene spinto da un acceleratore di lancio verso il tubo di scarico posteriore. Tale tubo ha un brandeggio verticale e orizzontale, con rotazione di 190°, ed è fornito di paratoie direzionali di flusso a regolazione elettromeccanica.

Il cantiere di raccolta (foto 6) ottimale risulta rappresentato dalla trinciatrice e da tre trattrici con rimorchio per il trasporto del cippato. Un numero inferiore di trattrici presuppone una non corretta gestione del cantiere.



Foto 6 – Claas Jaguar con testata GBE-1 in raccolta di pioppo biennale in piedi.

L'operatività della macchina è stata testata nel corso di alcune prove sperimentali svolte in diverse località italiane, facendo registrare capacità di lavoro operative e produzioni orarie operative variabili in funzione delle caratteristiche degli impianti raccolti.

Prove condotte tra il 2008 e il 2009 (Pari et al. 2009a) su impianti di pioppo al secondo ciclo di taglio (R4F2) hanno evidenziato capacità di lavoro operative comprese tra 0,80 e 1,20 ha/h. Essendo le produttività degli impianti pari, rispettivamente, a 69,88 e 79,41 t/ha, sono stati raccolti quantitativi di biomassa compresi tra 57,8 e 97,7 t di fresco per ora. Altre esperienze condotte nel centro Italia nel 2010 (Verani et al. 2010) hanno fatto registrare capacità di lavoro operative simili comprese tra 0,76 e 1,18 ha/h e produzioni orarie pari a 34,20 e 54,16 t.

Pezzatrice LWF

La pezzatrice LWF può essere abbinata ad una trattrice della potenza minima di 100 kW ed è costituita da una sega circolare e da un cilindro verticale, sulla cui superficie è avvolta una lama continua a spirale con coltelli. Il diametro massimo di taglio è di 70 mm. Le piante tagliate dal disco vengono trascinate verso la struttura fissa e sezionate

dalla lama a spirale. I coltelli verticali provvedono a spaccare le sezioni troppo grosse. Vengono prodotti pezzi lunghi circa 10 cm, scaricati tramite un tubo di lancio sui rimorchi delle trattrici. Il prodotto, risultando molto grossolano, deve essere affinato in un secondo momento. La produttività della macchina è di circa 2 t s.s./h (Spinelli et al. 2006a).

Raccolta in due fasi

Taglio e accumulo a bordo campo: abbattitrice e accumulatrice ZPZ

La ditta ZPZ snc di Osimo (AN), utilizzando il brevetto n. DP2002A008 del 22/11/2002 (ex ISMA), ha realizzato due macchine, una per il taglio e una per la raccolta e l'accumulo delle piante a bordo campo.

L'abbattitrice effettua il taglio delle piante rilasciandole sul terreno perpendicolarmente alla direzione di avanzamento della trattrice. Le file abbattute vengono raccolte e accumulate a bordo campo dalla trattrice con caricatore frontale. Le piante vengono cippate in una fase successiva in funzione delle richieste energetiche della centrale, utilizzando cippatrici semoventi dotate di braccio idraulico con pinza.

La macchina per il taglio è semiportata su slitte, collegata all'attacco a tre punti di un trattore da almeno 50 kW ed ha una massa complessiva di 580 kg.

Il disco di taglio, del diametro e spessore pari rispettivamente a 600 mm e 4 mm, deriva il proprio moto dalla presa di potenza del trattore attraverso un rinvio che ne moltiplica il numero di giri, eseguendo il taglio a 2200 giri/min.

L'organo di taglio è collegato al telaio della macchina in modo tale da poter essere ruotato di 90°, consentendone il trasporto su strada. Un martinetto idraulico, inoltre, permette di regolare l'escursione laterale in relazione alle caratteristiche dell'impianto.

L'altezza di taglio è regolata da due slitte laterali che scaricano parte del peso della macchina sul terreno.

Sulla trattrice è montato uno spingitore, costituito da una barra in metallo a posizionamento regolabile, che favorisce la caduta laterale delle piante e il loro posizionamento perpendicolare rispetto alla direzione di avanzamento del mezzo (foto 7, 8, 9).



Foto 7 - Abbattitrice ZPZ. Sono visibili il dispositivo di taglio e il profilato in metallo per agevolare la caduta delle piante.



Foto 8 – Abbattitrice in fase di lavoro.



Foto 9 - Posizionamento delle piante tagliate.

La macchina per l'accumulo (foto 10) è un'operatrice adibita alla raccolta delle piante abbattute (foto 11) e al loro posizionamento a bordo campo in cumuli ordinati (foto 12), al fine di consentirne la successiva fase di cippatura.

La macchina è montata su un elevatore frontale portato da una trattrice a 4 ruote motrici della potenza minima di 70 kW.

Il prototipo è costituito da due puntali di 3130 mm di lunghezza, paralleli e distanti 1850 mm l'uno dall'altro. All'apice dei puntali sono montati due scalpelli, con la funzione di favorire la raccolta delle piante da terra. Il quantitativo massimo di biomassa che è possibile caricare sull'accumulatore frontale è di circa 1,4 t.

Poiché il prototipo a sega circolare opera iniziando dalle file esterne dell'appezzamento, l'accumulatore frontale crea ai bordi del campo due andane opposte costituite da singoli cumuli di piante tutte disposte nella stessa direzione.



Foto 10 - Macchina per la raccolta e l'accumulo delle piante abbattute a bordo campo.



Foto 11 - Accumulatrice in fase di raccolta.



Foto 12 - Accumulatrice in fase di scarico del prodotto raccolto.

Il cantiere di raccolta risulta rappresentato da due trattrici per l'abbinamento dell'abbattitrice e del caricatore frontale, oltre ad una cippatrice semovente con pinza caricatrice e relativi rimorchi a servizio.

L'operatività delle macchine è stata testata nel corso di una prova sperimentale svolta nel 2009 in provincia di Pesaro su un impianto di pioppo R2F2 da 53 t/ha. Le capacità di lavoro operative sono state pari a 0,48 ha/h (25,8 t/h) e 0,55 ha/h (29 t/h) rispettivamente per l'abbattitrice e l'accumulatrice (Pari et al. 2009b).

Raccolta e cippatura in due fasi con stoccaggio nell'interfila: taglia allineatrice Mantovani e cippatrice Jordan RH 25 con testata pick up

La taglia allineatrice Mantovani è una macchina semiportata che può essere applicata anteriormente ad una trattrice della potenza minima di 90 kW (foto 13). La macchina, con massa complessiva di 1700 kg, monta su un telaio di profilati metallici un sistema di taglio e un sistema di convogliamento e trasporto della pianta, oltre agli organi per l'indirizzo della pianta nell'interfila (foto 14, particolari a, b, c).

Il sistema di taglio è costituito da una lama del diametro e spessore pari rispettivamente a 800 mm e 10 mm, che opera a 700-1000 giri/min (deriva il proprio moto dalla presa di potenza del trattore attraverso un rinvio che ne moltiplica il numero di giri). L'altezza di taglio è regolabile agendo sul posizionamento verticale delle due ruote folli sulle quali appoggia la macchina.

Il sistema di convogliamento è costituito da una coclea orizzontale posizionata parallelamente alla direzione di avanzamento della macchina, da un profilato metallico laterale (regolabile in altezza e lunghezza) e da un sistema a stella folle. I primi due apparati hanno la funzione di convogliare le piante verso il sistema di trasporto; il sistema a stella, invece, dotato di un fermo di non ritorno, ha la funzione di agevolare l'ingresso delle piante nell'apparato di trasporto evitando possibili ingolfamenti.

Il sistema di trasporto è costituito da due coclee controrotanti, ortogonali rispetto all'avanzamento della macchina e posizionate ad un'altezza di 2 m, e da una coclea e un profilato metallico ad essa parallelo, posizionati nella parte basale. Questo sistema consente di trasportare le piante tagliate nell'interfila, lasciandole cadere parallelamente alla direzione di avanzamento della trattrice (foto 15). La movimentazione delle coclee avviene attraverso un sistema idraulico che consente di regolarne la velocità di rotazione in relazione alle caratteristiche della coltura.



Foto 13 – Taglia allineatrice Mantovani in fase di lavoro.



Foto 14 - Particolari del sistema di taglio (a), convogliamento (b) e trasporto (c).



Foto 15 – Andane formate dalla taglia allineatrice.

Il cantiere di abbattimento risulta rappresentato dall'abbattitrice abbinata alla trattrice e da una cippatrice con pick up.

L'operatività della macchina è stata testata nel corso di una prova sperimentale svolta nel 2008 in provincia di Ravenna su un impianto di pioppo R2F2 da 55 t/ha. La macchina ha

raggiunto una capacità di lavoro operativa dell'ordine di 0,55 ha/h, corrispondente a 31,03 t/h (Pari e Civitarese 2008).

Il prodotto andanato è stato successivamente raccolto con la testata cippatrice pick up Jordan RH 25.

La cippatrice, del peso di circa 2500 Kg, viene montata sul retro di trattori muniti di guida retroversa della potenza di almeno 180 kW. La macchina è in grado di cippare piante con diametro massimo di 28 cm ed è equipaggiata, in posizione frontale, con un dispositivo pick up, un sistema di alimentazione del cippatore e due pareti metalliche ad imbuto (foto 16) (Spinelli et al. 2007).

La macchina, procedendo lungo l'interfila, raccoglie e cippa in fase dinamica le piante precedentemente abbattute dall'abbattitrice andanatrice, provvedendo a scaricare il cippato sui rimorchi delle trattrici (foto 17).



Foto 16 – Testata cippatrice pick up Jordan RH 25.



Foto 17 – Macchina in fase di lavoro.

Il pick up risulta costituito da una coclea convergente con 8 serie di spirali (lunghezza 1750 mm) e svolge la funzione di sollevare da terra i calci delle piante. Allo scopo di evitare ingolfamenti dovuti alla presenza di infestanti, tra le spirali sono stati inseriti dei rilievi metallici paralleli all'asse di rotazione del pick up stesso. Il prodotto, una volta sollevato da terra viene convogliato verso il dispositivo di alimentazione che risulta composto da due grossi rulli verticali rotanti (diametro 150 mm, lunghezza 1750 mm), uno fisso e l'altro mobile in funzione delle dimensioni delle piante.

Un altro aspetto interessante riguarda il sistema di livellamento posizionato sul lato destro della testata, che garantisce il contatto tra la raccogliitrice e il terreno assecondandone le irregolarità. Il dispositivo è costituito da un sistema magnetico a pendolo con due sensori, che agisce direttamente sull'attacco a tre punti del trattore (foto 18).



Foto 18 – Particolari del dispositivo di autolivellamento.

Sul retro della testata sono state posizionate due ruote metalliche che hanno la funzione di scaricare a terra il peso della macchina. Il tubo di scarico posteriore, a brandeggio verticale e orizzontale, sovrasta la testata e direziona lo scarico del prodotto sul rimorchio.

Prove condotte nel 2010 su di un impianto di pioppo biennale andanato (località Boccaleone di Argenta), hanno fatto registrare una capacità di lavoro operativa di 0,50 ha/h e una produzione oraria operativa di 35,5 t/h.

Meccanizzazione attualmente impiegata nell'impianto delle MRF (Medium Rotation Forestry) di pioppo

Il trapianto del pioppo quinquennale può essere eseguito con trivella o con macchine munite di assolcatore.

La trivella (diametro di 15-20 cm) è portata posteriormente all'attacco a tre punti del trattore ed effettua l'apertura delle buche nel terreno. Un operatore segue la macchina in campo ed inserisce gli astoni all'interno delle buche, chiudendole utilizzando il terreno riportato in superficie. Tale sistema, derivato direttamente dall'arboricoltura da legno, presenta diversi svantaggi legati alla bassa capacità di lavoro operativa e all'eccessivo affaticamento dell'operatore sul terreno.

Le macchine trapiantatrici presenti sul mercato sono attualmente due: la pianta astoni Allasia V1 e la trapiantatrice Alasia (foto 19).



Foto 19 – Trapiantatrice di astoni Alasia munita di assolcatore e dischi chiudi solco.

Entrambe le macchine prevedono il taglio del terreno mediante assolcatore e l'inserimento manuale degli astoni in fondo al solco da parte di due operatori (foto 20).



Foto 20 – Trapiantatrice di astoni in fase di impianto.

Subito dopo la messa a dimora il solco viene chiuso da due dischi rincalzatori opportunamente inclinati. Due ruote provvedono infine a compattare il terreno nei pressi del colletto della pianta. Sopra il telaio è presente un pianale per il trasporto del materiale. La distanza di trapianto sulla fila viene segnalata all'operatore tramite un segnale acustico o luminoso comandato da un dispositivo elettrico. Nel caso della pianta astoni Allasia V1 gli operatori seguono la macchina direttamente sul terreno, nel caso della trapiantatrice Alasia gli operatori lavorano sulla macchina. Quest'ultima è stata testata nel 2012 presso la sede del CRA ING di Monterotondo, facendo registrare una capacità operativa di 0,25 ha/h (Sperandio e Verani 2012).

Meccanizzazione attualmente impiegata nella raccolta delle MRF (medium Rotation Forestry) di pioppo

La raccolta delle Medium Rotation Coppice (MRC) non può avvenire con le medesime macchine impiegate per le SRF (Fiala e Bacenetti 2009) ma presuppone l'impiego di cantieri forestali (Spinelli et al. 2008). Il livello di specializzazione varia in funzione della

taglia delle piante, della provvigione ad ettaro, dell'estensione dei campi e dell'indirizzo produttivo (solo cippato o produzione mista tondello e cippato) (Spinelli et al. 2006b). L'impiego della meccanizzazione avanzata induce, in molti casi, un effetto positivo sul costo di produzione di tutte le operazioni eseguite (Verani e Sperandio 2003).

Nel nostro paese sono presenti diverse macchine in grado di meccanizzare completamente le operazioni di abbattimento ed allestimento (foto 21, 22, 23), oltre a potenti cippatrici per la riduzione in scaglie di cimali e ramaglie (Pezzolato, Morbark, Gandini ecc).



Foto 21 - Testata Timberjack 762 C su motrice forestale 1270 B.



Foto 22 - Testata abbattitrice allestitrice su escavatore cingolato.



Foto 23 - Forwarder in fase di carico.

Il pioppeto, proprio per le sue caratteristiche (fusti dritti, ramosità contenuta, terreni pianeggianti e non accidentati) (foto 24), è facile da raccogliere (Spinelli e Hartsough 2006) e si presta alle potenzialità produttive di macchine complesse (Verani e Sperandio 2007).



Foto 24 – Impianto di pioppo a ciclo quinquennale.

Sono stati condotti numerosi studi sulla possibilità di introdurre un certo livello di meccanizzazione nella filiera pioppo (Cielo et al. 2002; Cielo e Zanuttini 2004; Cielo e Zanuttini 2007; Spinelli 2004; Verani e Sperandio 2004; Verani e Sperandio 2006). Una sintesi dei risultati ottenuti a riguardo è stata pubblicata nella Relazione Finale, progetto Ri.Selv.Italia, Sottoprogetto 2.2 (a cura del CRA-PLF di Casale Monferrato - AL) dove si evince da un lato l'adeguatezza e l'elevata produttività dell'harvester e delle macchine combinate, dall'altro alcune criticità sul piano economico in quanto non sono stati ottenuti risultati del tutto univoci.

Per quanto concerne la fase di abbattimento il mercato offre diverse soluzioni con dispositivi di taglio a catena, a disco o a cesoia.

Tra le abbattitrici con sega a catena possiamo citare, ad esempio, la Norrhydro NH016, in grado di operare su piante con diametri fino a 25 cm, e la Valmet 233, in grado di operare su piante fino a 80 cm. Entrambe sono abbinabili a escavatori di diversa potenza e taglia. Tra le abbattitrici a cesoia possiamo citare le serie Naarva-Grip e Schnitt-Griffy, ma esistono anche macchine più specializzate che effettuano abbattimento, concentramento e allestimento (harvester su motrici forestali) (Agostinetto et al. 2007).

Un interessante studio condotto in Lombardia dal CNR Ivalsa ha permesso di valutare, in maniera dettagliata, l'utilizzo di 4 diverse macchine abbattitrici su pioppo quinquennale allevato a MRF:

- abbattitrice accumulatrice Davco QC 1400;
- cesoia accumulatrice Naarva Grip 1600-40 E;
- abbattitrice combinata Timberjack 762 C;
- abbattitrice combinata Keto 150.

L'abbattitrice accumulatrice Davco QC 1400 consiste in una sega a disco ad azionamento idraulico, abbinata ad una struttura portante munita di doppio braccio accumulatore. La macchina ha un peso di 700 kg, una capacità di taglio fino a 30-35 cm e può tagliare sia singole piante che più fasci di piante (Spinelli et al. 2006a; Agostinetto et al. 2007). Può essere abbinata a minicaricatori della potenza minima di 70 kW oppure a escavatori di piccole e medie dimensioni (Bidini 2004).

La cesoia accumulatrice Naarva Grip 1600-40 E ha un peso di 560 kg e si compone di una cesoia e di un doppio braccio di presa, montata all'estremità di un braccio idraulico. La macchina è in grado di accumulare sino a 6 fusti o polloni. Raggiunta la capienza massima disponibile il braccio viene ruotato verso il campo e i fusti vengono scaricati a terra (Agostinetto et al. 2007). Richiede una potenza minima di 90 kW ed è in grado di abbattere piante fino a 32 cm di diametro (Spinelli et al. 2006a).

L'abbattitrice combinata Timberjack 762 C ha un peso di 1270 kg e richiede una potenza minima di 160 kW. L'organo di taglio è rappresentato da una sega a catena ed è in grado di operare su piante con diametro fino a 65 cm (Spinelli et al. 2006a).

L'abbattitrice combinata Keto 150 ha un peso di 1040 kg e richiede una potenza minima di 100 kW. L'organo di taglio è rappresentato da una sega a catena ed è in grado di operare su piante con diametro fino a 55 cm.

La Timberjack e la Keto sono operatrici complesse in grado di effettuare anche la sramatura e la sezionatura (Spinelli et al. 2006a).

Nel corso delle prove le macchine sono state abbinate rispettivamente ad un minicaricatore cingolato Bobcat T300, un escavatore gommato Caterpillar 315 da 90 kW, una motrice forestale specializzata 1270B da 160 kW e un escavatore cingolato Daewoo 160.

Il metodo di lavoro prevedeva l'abbattimento e l'accatastamento di un certo numero di file (5-6) e la successiva cippatura con una cippatrice semovente Morbark Hurricane 2400 XL (potenza 200 kW).

Il minicaricatore usato nel cantiere 1 e l'escavatore gommato del cantiere 2 sono macchine comunemente impiegate nei cantieri edili ed adattabili all'uso forestale col vantaggio della reversibilità. Secondo lo studio sopra citato la produttività delle macchine risulta compresa tra le 10 e le 20 t/h.

SOLUZIONI TECNICHE E INNOVAZIONI PROPOSTE

L'indagine condotta ha permesso di definire una serie di azioni volte a migliorare gli aspetti qualitativi, operativi, economici o ambientali legati al processo produttivo. La ricerca, in questo contesto, punta a risolvere le problematiche che rallentano la diffusione delle agro energie attraverso l'immissione nel mercato di sistemi e tecnologie innovative.

Le macchine analizzate per l'impianto del pioppo a ciclo biennale e quinquennale non equipaggiano sistemi automatici o parzialmente automatici per la messa a dimora del materiale di propagazione e, pertanto, le operazioni vengono svolte manualmente da uno o più operatori.

Sono stati quindi sviluppati un dispositivo automatico di alimentazione delle talee e una trapiantatrice semiautomatica per la messa a dimora degli astoni, con benefici economici, operativi ed ergonomici. Per quanto concerne la raccolta in due fasi con stoccaggio nell'interfila, dopo aver valutato la bassa capacità di lavoro dell'unica abbattitrice andanatrice commerciale e l'impossibilità di garantire la sostenibilità economica del cantiere, la ricerca è stata incentrata nello sviluppo di un nuovo prototipo, in grado di abbattere i costi di raccolta ed eseguire il lavoro con una capacità operativa nettamente superiore al modello commerciale.

È stato inoltre ampliato il parco macchine in grado di operare la raccolta e la cippatura della biomassa stoccata nell'interfila, realizzando un dispositivo pick up da montare sulla falciatrinciacaricatrice Spapperi RT, da affiancare alla versione commerciale Jordan RH 25. Le due operatrici sopra citate, tuttavia, presentano capacità di lavoro relativamente basse e il loro utilizzo può trovare giustificazione solo nel caso di comprensori energetici limitati. L'impiego di trincia agricole più performanti comporta, invece, problematiche differenti che portano ad escludere completamente il loro utilizzo, così come evidenziato nel corso di una prova condotta con la falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar equipaggiata con prototipo di testata pick up (foto 25 e 26).



Foto 25 – Testata pick up per Claas Jaguar.



Foto 26 – Claas Jaguar con testata pick up in raccolta di pioppo biennale andanato.

Nonostante l'interfila delle piantagioni in cui è prevista la raccolta in due fasi sia di 3,50 m, lo sviluppo delle ceppaie e dei polloni secondari riduce la larghezza utile di lavoro a valori inferiori ai 3 m (foto 27). Poiché la raccoglitrice presenta una carreggiata minima di 2990 mm (con pneumatici 650/75 R32), il suo passaggio produce danni non trascurabili ai

polloni secondari, oltre ad un'eccessiva rincalzatura del colletto delle piante (foto 28). Quest'ultimo aspetto comporta, nelle ceduzioni successive, un progressivo innalzamento dell'altezza di taglio con relative problematiche di carattere operativo.



Foto 27 – Interfila e spazio utile al transito delle raccoglitrici in impianti realizzati per la raccolta in due fasi.



Foto 28 – Danni prodotti dal transito della Claas Jaguar con testata pick up.

Ad oggi, gli impianti di pioppo a ciclo biennale hanno visto una maggiore diffusione e ciò è da mettere in relazione con il buon livello di meccanizzazione disponibile. Parliamo di una meccanizzazione prettamente agricola e ampiamente disponibile sul mercato, rappresentata da falciatrinciacaricatrici semoventi equipaggiate con apposite testate da

biomassa (Pari et al. 2009a), falciatrinciacaricatrici semiportate (Pari e Civitarese 2009) e abbattitrici azionate da trattrici agricole (Pari et al. 2009b, Pari e Civitarese 2008).

Il pioppo allevato a ciclo quinquennale, invece, necessita di attrezzature e mezzi tipicamente forestali, ovvero unità operative più o meno specializzate che, seppur sufficientemente reperibili sul mercato, non consentono di sfruttare al meglio il parco macchine normalmente a disposizione delle aziende di media e grande estensione.

Utilizzando l'esperienza maturata nella raccolta in due fasi è stato sviluppato un cantiere ad hoc anche per il pioppo quinquennale, realizzando una seconda abbattitrice andanatrice (da abbinare ad una trattrice di potenza adeguata) e una cippatrice semovente polifunzionale in grado di operare, a seconda della testata montata, sia su piante biennali in piedi, sia su piante biennali e quinquennali andanate.

Il nuovo cantiere consente di semplificare le fasi di lavoro in quanto punta a minimizzare la movimentazione della biomassa e l'uso di macchine e attrezzature di utilizzo più tipicamente forestale (forwarder, verricelli, caricatori ecc.). Ciò si ripercuote positivamente sui costi di raccolta.

La cippatrice semovente, oltre a permettere di raccogliere il pioppo quinquennale andanato in fase dinamica, consente di risolvere e migliorare anche alcune problematiche legate alla raccolta del pioppo biennale, sia in piedi che andanato. Relativamente a quest'ultimo aspetto, infatti, occorre considerare che la raccoglitrice, avendo una larghezza di lavoro di 2510 mm, è in grado di operare nell'interfila senza causare danni alla coltura garantendo, al contempo, una buona produttività. Relativamente alla raccolta del pioppo in piedi occorre invece ricordare che la Claas Jaguar non è in grado di operare su piante con diametro superiore a 15 cm. Stagioni meteo avverse possono impedire la raccolta regolare del prodotto portando gli impianti fuori turno. In queste condizioni le piante possono raggiungere dimensioni tali da non consentire l'ottimale utilizzo della macchina, con ripercussioni negative sull'intera filiera (foto 29). Il gruppo cippatore abbinato alla semovente, essendo in grado di cippare piante con diametri fino a 38 cm, potrebbe rappresentare l'unica soluzione attuabile per la raccolta degli impianti SRF fuori turno.



Foto 29 – Impianto di pioppo biennale fuori turno (tre anni di radice e tre anni di fusto).

MATERIALI E METODI

Sviluppo delle innovazioni

Dopo una prima fase incentrata sulla valutazione delle tecnologie disponibili sul mercato sono state individuate le possibili innovazioni da sviluppare al fine di migliorare gli aspetti produttivi, qualitativi ed economici della filiera agro energetica. La procedura seguita consisteva nell'individuazione dell'innovazione, nella pubblicazione di un bando di gara con procedura negoziata contenente, oltre ai termini del bando, indicazioni sulle caratteristiche che la nuova macchina doveva avere e sulle operazioni che la stessa doveva eseguire. La ditta aggiudicataria della gara, quindi, procedeva alla progettazione e alla realizzazione del prototipo. Tutte le macchine sviluppate sono state testate conducendo una serie di prove in campo volte a valutare le caratteristiche finali della macchina (in quanto diverse dall'idea progettuale), le prestazioni, la qualità del lavoro svolto, le eventuali migliorie e modifiche da apportare al fine di raggiungere gli obiettivi previsti dalla sperimentazione.

Rilievi in campo pre e post raccolta

Impianti a ciclo biennale

I rilievi volti a determinare le caratteristiche della coltura e la qualità del lavoro svolto dalle macchine sono stati effettuati secondo la metodologia pubblicata sulle “linee guida per l'esecuzione delle prove di raccolta in SRF” della Aberdeen University – Department of Forestry (Mitchell et al. 1997). Il protocollo prevede l'individuazione di 30 ceppaie campione (10 nel caso di impianti uniformi), scelte sulla base di una distanza di campionamento prefissata², sulle quali misurare e/o valutare i seguenti parametri:

- numero di fusti per ceppaia (alti almeno 1,5 m);
- distanza effettiva tra le file;
- distanza effettiva sulla fila;

² La distanza di campionamento si ottiene dividendo la lunghezza totale di tutte le file dell'appezzamento (n° di file per la lunghezza media di 4 file scelte a caso) per il numero di ceppaie campione.

- diametro dei polloni principali e secondari (2 misure perpendicolari a 100 mm da terra);
- altezza dei polloni principali e secondari;
- biomassa;
- altezza di taglio;
- danni alle ceppaie.

I danni alle ceppaie sono stati rilevati considerando le seguenti tipologie di danno: nessun danno, spacco verticale, sfrangiamento della superficie di taglio. L'entità del danno è stata invece riferita alla seguente scala di valutazione: danno lieve, danno serio, danno molto serio, ceppaia completamente distrutta.

Le perdite di biomassa in campo sono state valutate pesando tutto il materiale, “tagliato e non raccolto” e/o “non tagliato”, presente per almeno la metà del proprio volume all'interno di 5 plot di 8 m² (2 m x 4 m), posizionati a caso ma orientati con il lato più lungo in direzione delle file. Nei medesimi plot è stata rilevata anche la percentuale di fallanze.

La produttività delle piantagioni è stata valutata in due modi differenti a seconda della disponibilità o meno di una pesa aziendale. Nel primo caso è stata effettuata la pesatura integrale della biomassa raccolta e cippata mentre, nel secondo caso, la produttività è stata stimata moltiplicando la biomassa media rilevata per ciascuna ceppaia campione per la densità di impianto effettiva (tenendo conto della percentuale di fallanze). Tale procedura è stata adottata anche per valutare la produttività degli impianti interessati dalle sole operazioni di abbattimento.

Impianti a ciclo quinquennale

I rilievi volti a determinare le caratteristiche della coltura e la qualità del lavoro svolto dalle macchine sviluppate per la raccolta delle MRF sono stati effettuati misurando e visionando tutte le piante e le ceppaie localizzate lungo le 3 file utilizzate per la prova (superficie netta 1440 m²). Prima dell'abbattimento sono stati rilevati la percentuale di fallanze e i diametri, quest'ultimi misurati con cavalletto dendrometrico a 100 mm di altezza.

Dopo l'abbattimento sono stati valutati, invece, la lunghezza delle piante, l'altezza di taglio e la regolarità delle andane.

I danni alle ceppaie sono stati valutati seguendo la medesima classificazione illustrata per gli impianti biennali.

La biomassa ad ettaro è stata quantificata mediante pesatura integrale del prodotto raccolto e cippato durante la prova, a cui sono state aggiunte le perdite rilevate. Quest'ultime sono state quantificate raccogliendo e pesando la biomassa rimasta in andana dopo il passaggio della raccoglitrice, valutata all'interno di 9 plot di 30 m² ciascuno (3 m x 10 m) distribuiti ad intervalli regolari lungo le 3 file.

Caratterizzazione del cippato prodotto

Il cippato raccolto durante le diverse prove sperimentali è stato classificato seguendo le normative europee di riferimento EN, analizzando la massa volumica apparente (UNI EN 15103:2009), l'umidità (UNI EN 14774-2:2009) e la granulometria (CEN/TS 15149-1:2006).

Massa volumica apparente - bulk density

La massa volumica apparente del cippato è stata determinata utilizzando un cilindro di volume noto, appositamente realizzato per la conduzione delle prove. Il cilindro, in acciaio, aveva un diametro interno di 295 mm e un'altezza di 380 mm, con un rapporto altezza/diametro di 1,29³.

Il contenitore, una volta riempito di cippato, veniva lasciato cadere da un'altezza di 150 mm su un pannello di legno (dalle 2 alle 4 volte) al fine di favorire l'assestamento delle particelle, colmando lo spazio vuoto o rimuovendo il materiale in eccesso. Ultimata la

³ La normativa UNI EN 15103:2009 richiede un rapporto h/Ø compreso tra 1,25 e 1,5.

procedura sopra descritta si procedeva alla pesatura del cilindro con dinamometro da campo.

La massa volumica apparente del campione tal quale è stata calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$BDar (Mar) = (m_2 - m_1) \times V^{-1}$$

dove:

BDar= massa volumica del campione tal quale (kg/m³)

Mar= percentuale di umidità del campione su base umida

m₁ = massa del contenitore vuoto (kg)

m₂ = massa del contenitore pieno (kg)

V = volume netto del cilindro (m³)

La tolleranza ammessa tra le diverse ripetizioni è pari al 3%, per campioni con bulk density inferiore a 300 kg/m³ e del 2% per campioni con bulk density uguale o superiore a 300 kg/m³.

Contenuto di umidità

I campioni prelevati in campo, del peso minimo di 500 g, sono stati inseriti in contenitori sigillati e trasportati in laboratorio. Il materiale è stato essiccato in stufa termoventilata ad una temperatura di 105°±2°C fino al raggiungimento di un peso costante, deponendolo su vassoi in metallo non corrodibile, resistente al calore e di dimensioni tali da contenere tutto il campione nella proporzione di 1 g/cm². Le pesate sono state effettuate con bilancia di precisione d=0,1 g.

La procedura seguita per la valutazione del contenuto di umidità è stata la seguente:

- pesatura del vassoio pulito;
- pesatura del vassoio contenente il campione fresco;

- essiccamento in forno fino al raggiungimento di un peso costante, ovvero fino a quando la variazione del peso non supera lo 0,2% del peso totale, perso durante un ulteriore periodo di essiccamento di 60 minuti;
- pesatura dell'imballaggio contenente l'umidità persa dal materiale durante il trasporto;
- pesatura dell'imballaggio incontaminato utilizzato per il trasporto.

Il contenuto di umidità su base umida è stato calcolato con la seguente equazione:

$$\text{Mar} = (m_2 - m_3 + m_4) \times (m_2 - m_1)^{-1} \times 100$$

dove:

m_1 = peso del piatto o vassoio vuoto (g);

m_2 = peso del piatto o vassoio carico prima dell'essiccamento (g);

m_3 = peso del piatto o vassoio carico dopo l'essiccamento (g);

m_4 = peso del contenuto di umidità dell'imballaggio (g).

Valutazione della pezzatura

Per la valutazione della distribuzione granulometrica del cippato sono stati impiegati setacci con fori di diametro 3,15 mm, 16 mm, 45 mm e 63 mm.

La massa minima dei campioni utilizzati è stata pari a 8 litri, suddivisi in sottocampioni per evitare sovraccarichi. Al fine di impedire adesioni tra particelle i campioni sono stati essiccati all'aria prima della setacciatura.

La procedura seguita per la determinazione della distribuzione granulometrica è stata la seguente:

- pesatura del campione con bilancia di precisione $d=0,1$ g;
- distribuzione del campione (sottocampione) sul setaccio;
- setacciatura manuale con movimenti oscillatori sia verticali sia orizzontali;
- pesatura del materiale trattenuto da ciascun setaccio e dal panno collettore (approssimando a 0,1 g).

Il materiale con dimensioni superiori a 63 mm è stato classificato manualmente considerando la lunghezza maggiore della particella.

I risultati sono stati espressi come percentuale in peso dell'intero campione verificando che la differenza tra il peso totale del campione e il peso della somma di tutte le frazioni non fosse superiore al 2%.

Rilievo delle prestazioni delle macchine

I tempi di lavoro sono stati registrati con cronometro digitale e rilevati secondo la metodologia ufficiale della Commission Internationale de l'Organisation Scientifique du Travail en Agriculture (C.I.O.S.T.A.) (Bolli e Scotton 1987) e la raccomandazione dell'Associazione Italiana di Genio Rurale (A.I.G.R.) 3A R1 (Baraldi 1980).

Poiché lo studio mirava a valutare la produttività delle macchine in campo si è deciso di valutare il tempo standard (TS):

$$TS = TE + TA + TR + TMI$$

dove:

TE = tempo effettivo⁴;

TA = tempo accessorio⁵;

TR = tempo di riposo;

TMI = tempo morto inevitabile.

Tale tempo, non tenendo conto di quelli non strettamente legati al rapporto macchina-coltura (ad esempio tempo di preparazione in campo, tempo di trasferimento ecc.), non viene influenzato dalla durata del turno, dalla posizione del luogo di lavoro o più in generale da tutte quelle variabili che rendono meno omogenee le operazioni di confronto fra varie situazioni.

⁴ Il tempo effettivo (TE) rappresenta il tempo utile di lavoro al netto di ogni perditempo.

⁵ Il tempo accessorio (TA) risulta costituito dai tempi per le voltate (TAV), tempi per i rifornimenti e scarichi (TAS) e dai tempi di manutenzione (TAC).

Il rendimento di impiego η_i è stato calcolato come rapporto tra il tempo effettivo (TE) e il tempo standard (TS), facendo riferimento al rendimento operativo nei casi in cui il TR e il TMI risultavano pari a zero ($R_o = TE/TO^6$).

Le prestazioni di ciascuna macchina sono state quantificate calcolandone la capacità di lavoro operativa e la produzione oraria operativa. La prima esprime il rapporto tra la superficie lavorata e il tempo impiegato (ha/ora), la seconda il rapporto tra la quantità di prodotto raccolto e il tempo impiegato (t/ora).

Valutazione dei limiti operativi della macchina abbattitrice andanatrice CRA ING

I limiti operativi e il campo di applicabilità della macchina sono stati valutati considerando i dati raccolti durante le prove condotte su impianti a turno regolare (I e II ciclo) e fuori turno. Relativamente a quest'ultima tipologia di piantagioni sono state eseguite delle prove di abbattimento su un impianto di tre anni di radice e un anno di fusto (R3F1), un impianto di 5 anni di radice e 3 anni di fusto (R5F3) e un impianto di 3 anni di radice e 3 anni di fusto (R3F3) (tabella 2).

Tabella 2 – Descrizione degli impianti di pioppo fuori turno.

Regione	Umbria	Veneto	Veneto
Località	Città di Castello (PG)	Montagnana (PD)	Codevigo (PD)
Età	R3F1	R3F3	R5F3
Superficie (ha)	0,10	0,10	0,10
Quota (m s.l.m.)	266	16	3
Densità ($p\ ha^{-1}$)	6666	6666	6666
Distanza tra le file (cm)	300	300	300
Distanza tra le piante (cm)	50	50	50
Clone	AF2	Monviso	Monviso

⁶ La somma del tempo effettivo e del tempo accessorio costituisce il tempo operativo (TO): $TO = TE + TA$.

I test condotti sull'impianto R3F1 miravano a valutare la capacità della macchina nel trasportare e andanare piante molto piccole e dotate di scarsa lignificazione, caratteristiche, queste, generalmente riscontrabili nei polloni secondari. I test condotti sugli impianti R3F3 e R5F3, invece, miravano a individuare i limiti funzionali dell'operatrice.

Nello specifico sono state valutate le percentuali di ingolfamento, a carico del dispositivo di trasporto, in funzione di determinate classi di diametro (41-60 mm; 61-80 mm; 81-100 mm; 101-120 mm; 121-140 mm; 141-160 mm, 161-180 mm) e la capacità operativa potenziale dell'abbattitrice in funzione di diversi livelli di produttività. Le relazioni sopra indicate sono state rappresentate, rispettivamente, attraverso un'equazione polinomiale di II grado e un'equazione lineare.

Valutazione dei danni da compattamento prodotti in fase di raccolta

I danni da compattamento sono stati valutati considerando il transito delle macchine impiegate nella raccolta in una fase (falciatrinciacaricatrici e trattori con rimorchi carichi di cippato) e i danni prodotti dal passaggio dell'abbattitrice andanatrice CRA ING del cantiere in due fasi⁷. Non è stato possibile valutare il compattamento prodotto durante la raccolta della biomassa andanata (tra la fine di maggio e i primi di giugno) in quanto l'azienda ospitante, per necessità gestionali, ne ha richiesto la raccolta il giorno stesso dell'abbattimento.

I danni sono stati valutati in termini di incremento della massa volumica apparente e di incremento della resistenza alla penetrazione, rilevando i dati prima e dopo il passaggio delle macchine.

Prima dell'esecuzione delle prove sono stati rilevati i seguenti parametri:

- caratteristiche tecniche delle operatrici e delle motrici (tipo di macchina, marca, modello, massa complessiva, dimensione degli pneumatici);

⁷ Le prove sono state condotte il 18 marzo 2010 presso l'azienda Gambi (Località Mandriole - RA).

- contenuto di umidità e caratteristiche tessiturali del terreno, quest'ultime determinate sulla base di una serie di campioni prelevati e fatti analizzare presso un laboratorio specializzato.

Il contenuto di umidità è stato calcolato come differenza tra la massa umida e la massa secca rapportata alla massa umida del terreno ($U.R. \% = [M_u - M_s / M_u] \times 100$). I campioni sono stati prelevati con cilindro campionatore in 30 punti distribuiti in maniera casuale sull'appezzamento. Il peso fresco e secco dei campioni è stato misurato con bilancia di precisione ($d=0,01g$) mentre l'essiccamento è avvenuto in stufa a 110° fino al raggiungimento di un peso costante.

La resistenza offerta dal suolo alla penetrazione è stata determinata con l'ausilio di un penetrometro elettronico Eijkekamp - penetrologger a cono (angolo del cono 60° e area di base 1 cm^2) e i rilievi sono stati eseguiti lungo uno strato compreso tra 0 e 400 mm di profondità.

L'indice di cono è influenzato dalla massa volumica, dal contenuto di umidità, dalle caratteristiche del suolo ed esprime il rapporto tra la forza (N) applicata per infiggere nel terreno il puntale conico e l'area di base dello stesso.

Le tesi messe a confronto sono state:

- TESI 1 - raccolta e cippatura in un unico passaggio con falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar. La resistenza alla penetrazione è stata valutata effettuando 7 misurazioni dopo il passaggio della semovente con testata da biomassa ($T1_{op}$) e 5 misurazioni dopo il transito del trattore con rimorchio carico di cippato sulla medesima traccia lasciata dalla raccogliitrice ($T1_T$);
- TESI 2 - raccolta e cippatura in un unico passaggio con falciatrinciacaricatrice Spapperi mod. RT abbinata a una trattrice DEUTZ-FAHR (modello 720 Agrottron). La resistenza alla penetrazione è stata valutata effettuando 7 misurazioni dopo il passaggio della cippatrice ($T2_{op}$) e 7 misurazioni dopo il passaggio della trattrice abbinata ($T2_{mot}$);
- TESI 3 – abbattimento e andatura con prototipo CRA ING abbinato a una trattrice DEUTZ-FAHR (modello Agroplus 410). La resistenza alla penetrazione è stata valutata effettuando 7 misurazioni dopo il passaggio dell'abbattitrice ($T3_{op}$) e 7 misurazioni dopo il passaggio della trattrice abbinata ($T3_{mot}$);

- Tesi TI - terreno indisturbato. La resistenza alla penetrazione è stata valutata effettuando 21 misurazioni, variamente distribuite nell'area oggetto di indagine, mediando tutti i valori rilevati al fine di produrre una singola curva di confronto valida per tutte le tesi considerate.

Nelle tesi 2 e 3 le operatrici e le motrici presentavano una diversa carreggiata e, pertanto, le tracce lasciate dagli pneumatici non erano sovrapposte.

Per l'analisi della massa volumica apparente è stato utilizzato un campionatore volumetrico manuale Eijkelkamp, contenente un cilindro metallico normalizzato (volume 100 cm³) in cui il terreno entra indisturbato. La massa volumica apparente è stata calcolata come rapporto tra la massa secca del terreno contenuto nel cilindro (g) e il volume noto del cilindretto (cm³). I campioni sono stati prelevati nello strato di terreno compreso tra 80 e 130 mm di profondità, rimuovendo dal livello più superficiale le impurità.

Il protocollo prevedeva la valutazione della massa volumica apparente del terreno indisturbato e del terreno compattato dal transito delle diverse macchine.

Sono stati effettuati 12 campionamenti di terreno indisturbato (TI) e 3 campionamenti sulle orme lasciate da ciascuna macchina.

Valutazione del processo di disidratazione del pioppo andanato nell'interfila

Lo studio è stato condotto in tre piantagioni a giacitura pianeggiante localizzate nei seguenti comuni: Città di Castello - PG (sito 1), Medicina - BO (sito 2), Argenta - FE (sito 3) (figura 1). Gli impianti localizzati nei siti 2 e 3 si presentavano al secondo anno di vegetazione (due anni di radice e due anni di fusto – R2F2), quello del sito 1 si trovava invece al quarto anno di vegetazione e primo turno di ceduzione (quattro anni di radice e quattro anni di fusto – R4F4). In ciascun sito sono state rilevate le principali caratteristiche della coltura. Le operazioni di abbattimento sono avvenute con il prototipo di abbattitrice andanatrice sviluppato dal CRA ING.



Figura 1 - Localizzazione dei siti sperimentali.

Il contenuto di umidità delle piante andanate è stato monitorato attraverso campionamenti periodici iniziati il giorno dell'abbattimento e proseguiti fino al momento della cippatura.

Ciascun campionamento è consistito nel prelievo di 6 piante (comprehensive dei rami) raccolte in punti casuali: due piante a contatto col terreno, due piante in posizione intermedia e due piante nella parte alta dell'andana. Ciò al fine di tener conto dell'influenza diretta e indiretta dell'esposizione al sole, della circolazione dell'aria e dell'umidità del suolo nel processo di disidratazione. Le operazioni di abbattimento sono state effettuate il 20 febbraio nel sito 1 e il 10 di marzo nei siti 2 e 3. Il monitoraggio è stato effettuato fino al 17 giugno nei siti 1 e 3 e fino al 10 giugno nel sito 2. Complessivamente sono state raccolte 132 piante effettuando 9 campionamenti nel sito 1 (54 piante), 6 campionamenti nel sito 2 (36 piante) e 7 campionamenti nel sito 3 (42 piante). Il diverso numero di campionamenti per sito è da imputare alle diverse date di abbattimento e cippatura e alle condizioni meteo particolarmente avverse che non hanno consentito l'esecuzione di alcuni prelievi nei siti 2 e 3.

L'umidità è stata valutata in laboratorio secondo quanto previsto dalla normativa europea di riferimento. I principali parametri climatici (temperatura, precipitazioni, umidità relativa) caratterizzanti le aree oggetto di studio sono stati registrati da centraline meteo localizzate in prossimità dei siti sperimentali.

Per l'identificazione di un modello valido per la stima del numero di giorni di stoccaggio (variabile y) in funzione del contenuto di umidità delle piante (x) sono stati ipotizzati 3 modelli di regressione (lineare, parabolica, cubica):

$$y_i = \alpha_1 + \beta_1 x_i + v_i \quad (1)$$

$$y_i = \alpha_2 + \beta_2 x_i + \gamma_2 x_i^2 + u_i \quad (2)$$

$$y_i = \alpha_3 + \beta_3 x_i + \gamma_3 x_i^2 + \psi_3 x_i^3 + w_i v_i \quad (3) \quad i = 1, \dots, n$$

dove y rappresenta il numero di giorni di stoccaggio, x il livello di umidità delle piante, n il numero di osservazioni mentre v , u e w sono le componenti aleatorie di ogni modello e rappresentano l'errore. I parametri dei modelli sono stati stimati attraverso il metodo dei minimi quadrati ordinari, valutandone la significatività ad un livello del 5%. La bontà dei modelli è stata valutata attraverso l' R^2 corretto, considerando errori standard robusti (White 1980) ed utilizzando la procedura "Backward elimination" qualora uno o più parametri dei tre modelli risultassero statisticamente non significativi.

Valutazione della pezzatura del cippato ottenuto in funzione del contenuto di umidità delle piante e del dispositivo cippatore

Lo studio è stato condotto nella piantagione localizzata nel sito 3 precedentemente menzionato, analizzando e confrontando la pezzatura del cippato prodotto dalle falciatrinciacaricatrici Claas Jaguar e Spapperi in raccolta sia di pioppo in piedi (piante fresche) che di pioppo andanato (piante disidratate):

- tesi 1A: Claas Jaguar in raccolta di piante in piedi;
- tesi 1B: Claas Jaguar in raccolta di piante andanate;
- tesi 2A: Spapperi in raccolta di piante in piedi;
- tesi 2B: Spapperi in raccolta di piante andanate.

La Claas Jaguar è stata abbinata alla testata GBE-1 per la raccolta delle piante in piedi e ad un prototipo di testata pick up per la raccolta delle piante andanate. La Spapperi, invece, è stata utilizzata in configurazione standard per la raccolta delle piante in piedi e

con dispositivo pick up (montato in sostituzione dei dischi di taglio) per la raccolta del prodotto andanato.

Prima delle prove sono state rilevate le caratteristiche tecniche dei dispositivi di trinciatura delle due operatrici (tipologia, dimensioni, peso, numero coltelli).

Il contenuto di umidità delle piante è stato considerato come primo fattore di variazione e il dispositivo di cippatura il secondo. Le piante in piedi sono state cippate i primi giorni di marzo mentre quelle stoccate nell'interfila sono state cippate i primi di giugno.

Per ciascuna combinazione “sistema di raccolta/macchina” sono stati prelevati 5 campioni di cippato del peso di 500 g ciascuno per la determinazione della distribuzione granulometrica e del contenuto di umidità.

I dati sono stati analizzati statisticamente tramite analisi della varianza (ANOVA), usando il software MSTAT-C statistical package ed un livello di significatività dell'1%.

Calcolo dei costi di esercizio

Per il calcolo dei costi di esercizio delle macchine è stata utilizzata la metodologia di Baraldi e Capelli (Baraldi e Capelli 1973).

Il valore a nuovo è stato calcolato facendo riferimento ai prezzi correnti delle macchine operatrici e motrici (AA.VV. 2011a; AA.VV. 2011b). Al fine di rendere più omogeneo il confronto non si è fatto riferimento al prezzo di acquisto di una specifica macchina, bensì alla media dei prezzi di mercato di un certo numero di macchine a parità di potenza richiesta. Questo perché i prezzi a parità di classe possono differire di molte decine di migliaia di euro. Per i prototipi è stato utilizzato il prezzo indicativo fornito dai costruttori. Il valore residuo è stato calcolato pari al 18% del prezzo iniziale.

Le spese varie (permessi di circolazione, assicurazione e ricovero) sono state considerate corrispondenti all'1% e 1,5% del prezzo di acquisto, rispettivamente per i trattori e per le operatrici (Della Casa 1992).

Il consumo orario è stato calcolato considerando un consumo specifico di 0,3 l/kWh ed un carico motore del 40% per i trattori abbinati ai rimorchi ed operatrici che richiedono un basso assorbimento di potenza (es. trapiantatrice di talee), all'80% per le falciatrinciacaricatrici (Albissen et al. 2008) e per le trattatrici abbinate alle raccogliatrici (es. abbattitrice quinquennale). Il costo orario del combustibile è stato calcolato come segue:

$$CO = PM \times CM \times CS \times P$$

dove:

CO = costo orario combustibile (€);

PM = potenza motrice (kW);

CM = carico Motore (%);

CS = consumo Specifico (l/kWh);

P = prezzo combustibile (€/l).

Per il prezzo del gasolio agricolo si è fatto riferimento alle quotazioni dei prodotti petroliferi (Camera di Commercio di Roma – Listino prodotti petroliferi 2009).

La retribuzione media oraria lorda degli addetti che hanno partecipato al cantiere è risultata di 12,50 €/h, considerando una retribuzione mensile di 1479 € (operaio contoterzista di I livello), 14 mensilità, divisore per quota oraria e fattore per il calcolo della retribuzione lorda pari rispettivamente a 169 e 1,43:

$$\text{retribuzione media oraria lorda: } (1479 \times 1,43)/169 = 12,50 \text{ €/h}$$

L'acquisto di macchine presuppone di norma il ricorso al credito, è stato pertanto utilizzato un tasso di interesse annuo del 4%.

L'utilizzazione annua della macchina corrisponde al numero di ore di lavoro prestato in un anno, che è minore del monte ore annualmente disponibile. Per quanto concerne la falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar è stato considerato l'utilizzo annuale in due diverse colture, mais e pioppo, rispettivamente per 335 h/anno e 440 h/anno, per un periodo di vita utile della macchina di 8 anni (Capelli 1989). Sebbene tale durata economica sia relativa ad un uso esclusivo della falciatrinciacaricatrice su colture tradizionali, si è scelto

di mantenere costante tale parametro in quanto bilanciato nei costi di riparazione e manutenzione da un incremento delle spese di manutenzione dal 6% (Culpin 1975) al 12%. Ciò al fine di tener conto del maggior utilizzo annuo e delle diverse sollecitazioni meccaniche a cui la macchina è sottoposta durante la raccolta delle SRF.

I costi di riparazione e manutenzione dei trattori, dei rimorchi e delle operatrici sono stati considerati pari rispettivamente al 7,125% (Culpin 1975), al 2% e all'8%, con un utilizzo annuo di 875 ore per le trattrici e i rimorchi (435 h/anno su colture tradizionali e 440 h/anno su colture energetiche). In tutti i casi è stato considerato un periodo di vita utile della macchina di 8 anni, ad eccezione dei rimorchi per i quali è stato considerato un periodo di vita utile di 15 anni.

Ciascuna macchina oggetto di studio, infine, è stata valutata sulla base di una serie di considerazioni di seguito elencate:

- trapiantatrice di talee SPAPPERI TP 200, versione manuale e automatica:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,60 ha/h e 4000 talee/ora per entrambe le versioni;
 - utilizzo annuo: 275 ore;
 - acquisto di una trattrice da 60 kW: 43152 €
 - acquisto della trapiantatrice in versione manuale e automatica: 23000 € e 29000 €;
 - numero operatori: 3 per il cantiere manuale (un trattorista e due operatori sulla trapiantatrice), 2 per il cantiere automatico (un trattorista e un operatore di supporto).

- cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,99 ha/h e 59,41 t/h⁸;
 - utilizzo annuo della testata da biomassa GBE-1: 440 ore;
 - acquisto di una falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar da 390 kW: 320650 €;
 - acquisto di una testata GBE-1: 90000 €;
 - acquisto di tre trattrici da 80 kW: 170151 € (56717 € ciascuna);
 - acquisto di tre carri da 25 m³: 75000 € (25000 € ciascuno);

⁸ Media dei dati rilevati su impianti al primo e secondo taglio.

- numero operatori: 4 (tre trattoristi e un macchinista).
- cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,55 ha/h e 28,89 t/h;
 - utilizzo annuo della testata da biomassa: 440 ore;
 - acquisto di una trattrice da 150 kW: 131000 €;
 - acquisto del gruppo cippatore comprensivo della testata con dischi di taglio: 75000 €;
 - acquisto di due trattrici da 80 kW: 113434 € (56717 € ciascuna);
 - acquisto di due rimorchi da 25 m³: 50000 € (25000 € ciascuno)
 - numero operatori: 3 (tre trattoristi).
- cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale - abbattitrici andanatrici:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,56 ha/h e 31,03 t/h per l'abbattitrice Mantovani e 1,41 ha/h e 75,78 t/h per l'abbattitrice CRA ING;
 - utilizzo annuo delle abbattitrici: 440 ore;
 - acquisto di una trattrice da 80 kW: 56717 €;
 - acquisto delle abbattitrici: 27000 € per l'abbattitrice Mantovani e 40000 € per l'abbattitrice CRA ING;
 - numero operatori: 1 per ciascun cantiere (il trattorista).
- cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale andanato - falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT con dispositivo pick up:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,48 ha/h e 19,32 t/h;
 - utilizzo annuo della testata da biomassa: 440 ore;
 - acquisto di una trattrice da 150 kW: 131000 €;
 - acquisto del gruppo cippatore comprensivo della testata con dispositivo pick up: 75000 €;
 - acquisto di due trattrici da 80 kW: 113434 € (56717 € ciascuna);
 - acquisto di due rimorchi da 25 m³: 50000 € (25000 € ciascuno);
 - numero operatori: 3 (tre trattoristi).

- trapiantatrici di astoni manuale Alasia e semiautomatica CRA ING:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,30 ha/h e 509 astoni/ora per entrambe le macchine;
 - utilizzo annuo: 275 ore;
 - acquisto di una trattrice da 90 kW: 72791 €;
 - acquisto delle trapiantatrici: 6000 € per la trapiantatrice Alasia e 12000 € per la trapiantatrice CRA ING;
 - numero operatori: 3 per il cantiere manuale (un trattorista e due operatori sulla trapiantatrice), 2 per il cantiere semiautomatico (un trattorista e un operatore sulla trapiantatrice).

- cantiere di abbattimento del pioppo quinquennale – abbattitrice andatrice CRA ING:
 - capacità di lavoro e produzione oraria: 0,22 ha/h e 44 t/;
 - utilizzo annuo: 440 ore;
 - acquisto di una trattrice da 90 kW: 72791 €;
 - acquisto dell'abbattitrice CRA ING: 40000 €;
 - numero operatori: 1 (il trattorista).

- cantiere di raccolta e cippatura del pioppo biennale e quinquennale con cippatrice semovente Spapperi:
 - capacità di lavoro e produzione oraria della macchina in raccolta di pioppo quinquennale andanato: 0,18 ha/h e 35 t/h;
 - acquisto della semovente da 260 kW: 260000 €;
 - acquisto del gruppo cippatore comprensivo della testata pick up per la raccolta del pioppo biennale e quinquennale andanato: 110000 €;
 - acquisto del gruppo cippatore comprensivo della testata tradizionale per la raccolta del pioppo biennale in piedi: 110000 €;
 - utilizzo annuo della testata tradizionale per pioppo biennale: 440 ore;
 - utilizzo annuo della testata pick up per pioppo biennale e quinquennale andanato: 880 ore, 440 in inverno per il quinquennale e 440 ore in primavera per il biennale;
 - utilizzo annuo della semovente: 880 ore;
 - acquisto di tre trattrici da 80 kW: 170151 € (56717 € ciascuna);

- acquisto di tre carri da 25 m³: 75000 € (25000 € ciascuno);
- numero operatori: 4 (tre trattoristi e un macchinista).

Le prestazioni della macchina in raccolta di pioppo biennale (andato e in piedi) sono state invece stimate pari a 0,85 ha/h e 51 t/h. Tali valori, pur non avendo un riscontro oggettivo derivato da prove di raccolta, possono essere considerati verosimili se rapportati a quelli fatti rilevare dalla RT, nelle medesime condizioni operative, e se si considerano la maggiore potenza della semovente (260 kW vs 150 kW) e i limiti funzionali dei due cippatori (38 cm e 20 cm rispettivamente per la semovente e la RT).

Analisi statistica

I dati rilevati in campo sono stati inseriti su fogli di calcolo elettronici ed in funzione delle loro caratteristiche e della tipologia di indagine e disegno sperimentale si è proceduto ad appropriate analisi statistiche, al fine di risalire alla significatività di quanto raccolto ed alla validazione dei risultati.

Test T di Student

Il test t applicato è stato quello per campioni dipendenti, che prevede un numero uguale di repliche. E' un test con una buona potenza ma necessità di un buon numero di dati e, appunto per questa specifica applicazione, di un numero di campioni identico tra le due popolazioni campionarie. In mancanza di questo assunto è possibile applicare una variante (t test per campioni indipendenti) ma in tal caso, in genere, il test diviene meno potente.

Analisi della varianza (ANOVA), Tukey test (HSD), regressioni e relativi assunti

Uno dei test statistici più impiegati per confrontare le medie di più gruppi di campioni è l'ANOVA. Per poter procedere con una ANOVA omoschedastica, è necessario fare l'assunzione che le varianze dei k gruppi in analisi siano omogenee. I test per verificare l'omogeneità delle varianze sono numerosi; alcuni vengono applicati su campioni che seguono una distribuzione normale. In questo caso per la verifica dell'omogeneità delle

varianze è stato scelto il test di Levene. Il test di Levene è una statistica inferenziale utilizzata per valutare l'uguaglianza delle varianze nei diversi campioni. Alcune comuni procedure statistiche assumono che le varianze delle popolazioni da cui sono tratti diversi campioni sono uguali e il test di Levene valuta questa ipotesi. Si verifica l'ipotesi nulla che le varianze della popolazione sono uguali. Qualora il p-value del test di Levene sia inferiore a un certo valore critico (in genere 0,05), risulta improbabile che le differenze ottenute nelle varianze del campione si siano verificate sulla base di un campionamento casuale. Così, l'ipotesi nulla delle varianze uguali è respinto e si conclude che esiste una differenza tra le variazioni nella popolazione.

Le procedure che in genere assumono omogeneità della varianza includono analisi della varianza e t-test. Un vantaggio del test di Levene è che non richiede la normalità dei dati analizzati. Tale test è spesso usato prima di un confronto di mezzi. Quando il test di Levene è significativo si procede con altri test (ANOVA nel caso specifico), altrimenti le procedure di modifica sono assunte senza la parità di varianza. Altro punto cardine prima di applicare l'ANOVA è la verifica della normalità dei dati.

In questo lavoro viene applicato il test di Shapiro-Wilk. Il test è considerato uno dei più potenti per la verifica della normalità, soprattutto per piccoli campioni. La verifica della normalità avviene confrontando due stimatori alternativi della varianza σ^2 : uno stimatore non parametrico al numeratore, basato sulla combinazione lineare ottimale della statistica d'ordine di una variabile aleatoria normale, e uno stimatore parametrico al denominatore (varianza campionaria). Come in tutti i test di normalità, l'ipotesi nulla è che la popolazione dalla quale è stato estratto il campione non sia troppo differente dalla famiglia di distribuzioni che seguono la legge di Gauss, quindi che sia $N(\mu, \sigma^2)$ con μ e σ qualsiasi ma $\gamma_1 = 0$ e $\gamma_2 = 0$, contro l'ipotesi alternativa che sia diversa dalla normale a causa di asimmetria e/o curtosi. A questo punto possiamo procedere con il test ANOVA. L'analisi della varianza (ANOVA) è un insieme di tecniche statistiche facenti parte della statistica inferenziale che permettono di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi. L'ipotesi nulla solitamente prevede che i dati di tutti i gruppi abbiano la stessa origine, ovvero la stessa distribuzione stocastica, e che le differenze osservate tra i gruppi siano dovute solo al caso. L'ipotesi alla base dell'analisi della varianza è che dati n gruppi, sia possibile scomporre la varianza in due componenti: Varianza interna ai gruppi (anche detta Within)

e Varianza tra i gruppi (Between). La ragione che spinge a compiere tale distinzione è la convinzione, da parte del ricercatore, che determinati fenomeni trovino spiegazione in caratteristiche proprie del gruppo di appartenenza. In altre parole, il confronto si basa sull'idea che se la variabilità interna ai gruppi è relativamente elevata rispetto alla variabilità tra i gruppi, allora probabilmente la differenza tra questi gruppi è soltanto il risultato della variabilità interna.

Nel caso di differenze significative riscontrate con l'ANOVA, si è provveduto ad individuare eventuali gruppi omogenei con il test di Tukey o HSD sia per campioni con numeri uguali sia diseguali, tenendo un livello di significatività pari a 0,05.

Coefficiente di correlazione di Spearman

Per indagare circa la correlazione esistente tra due variabili, l'indagine è stata effettuata con l'ausilio del coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman. Il coefficiente di correlazione dei ranghi di Spearman consente di confrontare due graduatorie al fine di verificare se vi è associazione e, in caso positivo, se vi è concordanza oppure discordanza.

Quando il coefficiente di correlazione dei ranghi vale 1 vi è perfetta concordanza fra le graduatorie. Ciò significa che l'unità classificata come prima nella graduatoria rispetto ad X lo è anche nella graduatoria rispetto a Y, l'unità classificata come seconda nella graduatoria rispetto ad X lo è anche nella graduatoria rispetto a Y e così via. Quando il coefficiente di correlazione dei ranghi vale -1 vi è perfetta discordanza fra le graduatorie. Ciò significa che l'unità classificata come prima nella graduatoria rispetto ad X è ultima nella graduatoria rispetto a Y, l'unità classificata come seconda nella graduatoria rispetto ad X è penultima nella graduatoria rispetto a Y e così via. Infine se il coefficiente di correlazione dei ranghi vale zero, ciò indica che non vi è associazione fra le graduatorie.

RISULTATI

Sviluppo di innovazioni tecnologiche dedicate alle piantagioni da biomassa a ciclo biennale

Dispositivo automatico di alimentazione delle talee

Il dispositivo per l'alimentazione automatica della talea è stato progettato in maniera da consentirne l'applicazione sulle trapiantatrici commerciali ad elementi iniettori radiali. L'innovazione proposta esegue il prelievo della singola talea dalla cassetta di contenimento, il trasporto e l'inserimento della stessa nella pinza dell'elemento iniettore. Si compone di una cassetta per il contenimento del materiale di propagazione (figura 2 particolare A), di un sistema di distribuzione (figura 2 particolare B) e di un sistema di alimentazione (figura 2 particolare C). La cassetta per il contenimento delle talee ha un'altezza, una larghezza ed una lunghezza pari, rispettivamente, a 386 mm, 230 mm e 700 mm ed è in grado di contenere circa 900 talee, sufficienti alla messa a dimora di 1350 m².

Il movimento delle talee verso il piano di carico viene favorito dall'inclinazione del fondo della cassetta (13°) e dalla vibrazione prodotta su di essa da un sottostante motorino idraulico (la cassetta poggia su 4 silentblock in gomma) (figura 2 particolare D). Internamente alla cassetta sono posizionate due paratie antiaccumulo (figura 2 particolare E) ed un pannello dosatore (figura 2 particolare F), quest'ultimo azionato da un martinetto idraulico (figura 2 particolare G). La loro funzione è quella di ridurre il flusso di materiale favorendo il passaggio di una singola talea alla volta.

Un motorino (figura 2 particolare H) abbinato ad un pignone e ad una catena (figura 2 particolare I) fornisce il moto ad un alberino che aziona, tramite due coppie coniche sincronizzate, due catene verticali (figura 3 particolare A). Su queste ultime sono saldati una serie di spessori ad L (figura 3 particolare B) che provvedono al prelievo delle singole talee e al loro rilascio nella vasca dello spintore (figura 3 particolare C).

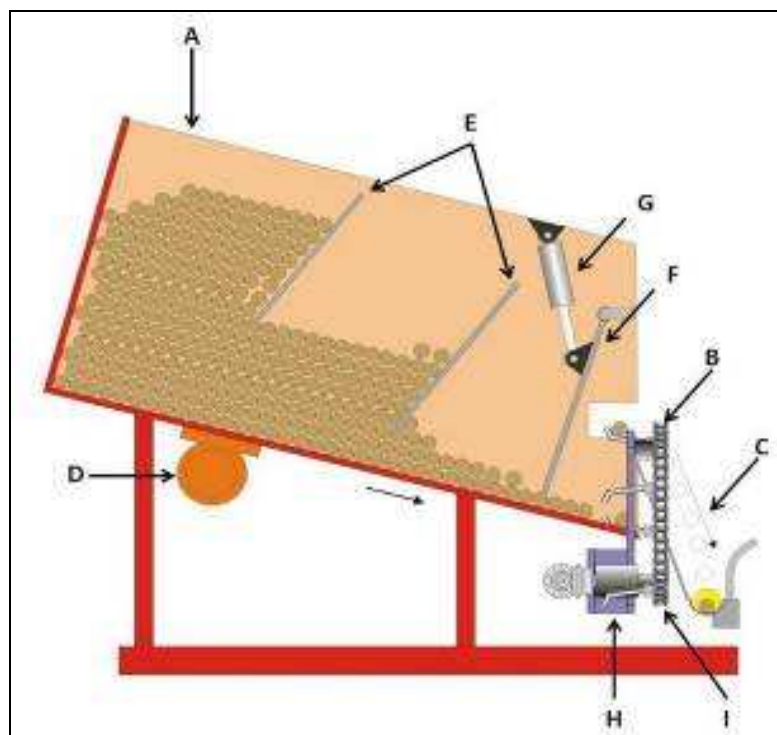


Figura 2 – Vista laterale del dispositivo per l'alimentazione automatica delle talee di pioppo.

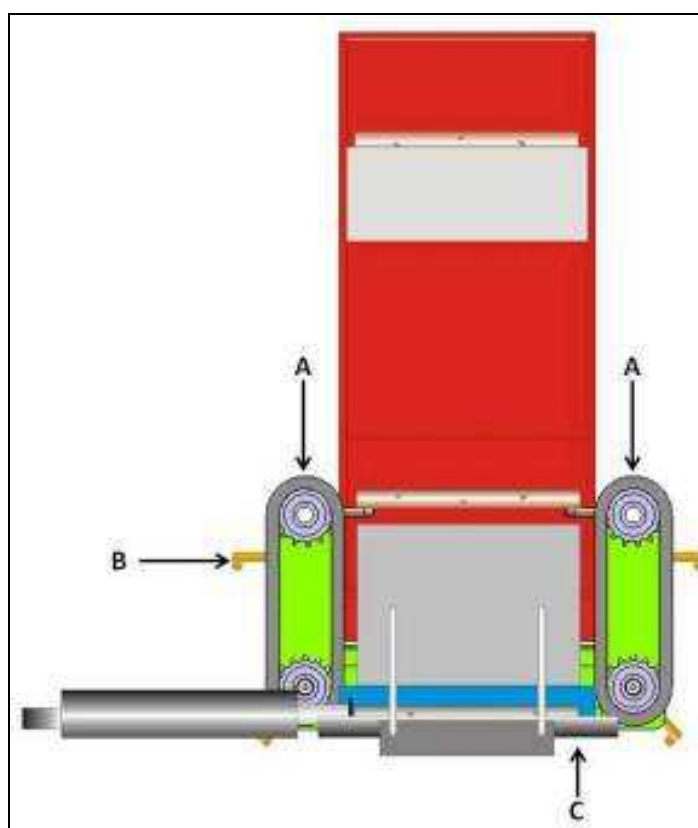


Figura 3 – Vista anteriore del dispositivo per l'alimentazione automatica delle talee di pioppo.

Le talee posizionate sul piano di distribuzione vengono introdotte nelle pinze degli elementi iniettori grazie all'azione di un martinetto idraulico (alesaggio 45 mm, diametro asta 35 mm, corsa 100 mm), sincronizzato con la ruota della trapiantatrice (figura 4).

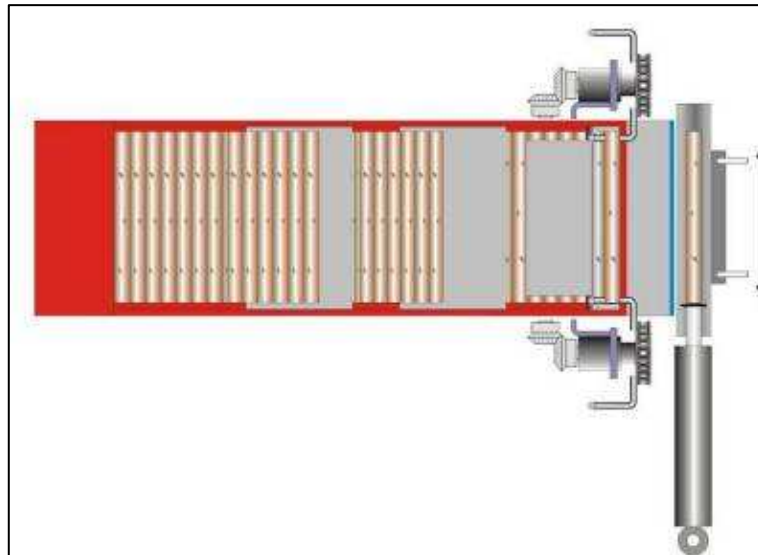


Figura 4 – Vista in pianta del dispositivo per l'alimentazione automatica delle talee di pioppo.

Abbattitrice andanatrice per pioppo a ciclo biennale

L'abbattitrice andanatrice è stata progettata per eseguire in sequenza l'abbattimento e la deposizione del pioppo biennale nell'interfila (figura 5). La macchina ha una massa complessiva di 1000 kg, un ingombro esterno in fase di lavoro di 3060 mm e monta su un telaio di profilati metallici una serie di dispositivi di taglio, convogliamento e trasporto, oltre agli organi per l'indirizzo della pianta nell'interfila (tabelle 3 e 4).

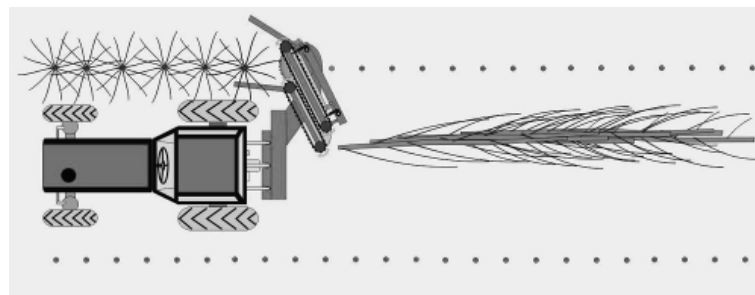


Figura 5 – Schema di funzionamento dell'abbattitrice andanatrice per pioppo a ciclo biennale.

Tabella 3 – Dati tecnici dell'abbattitrice andanatrice: dimensioni, sistema di taglio, sistema di convogliamento.

ABBATTITRICE ANDANATRICE		
Ingombro in fase di lavoro (larghezza e lunghezza)	mm	3006 x 2000
Ingombro in fase di trasporto (larghezza e lunghezza)	mm	2000 x 3500
Altezza massima	mm	2800
Massa complessiva	kg	1000
Pneumatici		205/65/15
Sistema di taglio		
Diametro della lama circolare	mm	650
Spessore della lama circolare e dei denti	mm	6
Numero di denti	N°	97
Velocità di rotazione	giri/min	2000-2200
Altezza minima di taglio	mm	50
Sistema di convogliamento		
Catene dentate	N°	2
Catena dentata di destra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	940
– Numero denti	N°	10
– Altezza da terra	mm	1600
Catena dentata di sinistra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	600
– Numero denti	N°	7
– Altezza da terra	mm	1600

Tabella 4 - Dati tecnici dell'abbattitrice andanatrice: sistema di trasporto e sistema di scarico.

Sistema di trasporto		
Catene gommate	N°	4
Catena gommata superiore destra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	2300
– Numero tasselli gommati	N°	46
– Altezza da terra	mm	1745
Catena gommata superiore sinistra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	2070
– Numero tasselli gommati	N°	41
– Altezza da terra	mm	1745
Catena gommata inferiore destra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	2030
– Numero tasselli gommati	N°	40
– Altezza da terra	mm	610
Catena gommata inferiore sinistra	N°	1
– Lunghezza di lavoro	mm	2070
– Numero tasselli gommati	N°	41
– Altezza da terra	mm	610
Sistema di scarico		
Profilato in metallo	N°	2
– Altezza da terra (massima e minima)	mm	2780 – 1170

Il sistema di taglio è costituito da una lama del diametro e spessore pari rispettivamente a 650 mm e 6 mm, con denti forniti di supporto indurito al cromo. La lama deriva il proprio moto dalla presa di potenza del trattore attraverso un rinvio che ne moltiplica il numero di giri, in modo che la lama possa operare a 2000-2200 giri/min. Le due ruote folli sulle quali poggia la macchina svolgono la triplice funzione di sorreggere la macchina in fase di lavoro, agevolare l'intercettazione della pianta da parte del sistema di convogliamento e regolare l'altezza di taglio.

Il sistema di convogliamento è costituito da due profilati in metallo, posizionati in prossimità del disco di abbattimento e da due catene dentate, posizionate a 1600 mm da terra e azionate da due motori idraulici.

La pianta, spinta verso il sistema di convogliamento grazie alla progressione del trattore, viene successivamente intercettata dal sistema di trasporto, costituito da due coppie di catene gommate contro rotanti accoppiate, una inferiore e una superiore. La coppia

inferiore è posizionata a 610 mm da terra, quella superiore ad un'altezza di 1745 mm. Il sistema di trasporto svolge, in parte, anche la funzione di convogliamento, grazie alla posizione più avanzata delle catene gommata poste sul lato destro (foto 30).

Il moto è fornito da tre motori idraulici, uno per le catene posizionate sul lato sinistro, che risultano in linea sugli stessi alberi, e due per le catene posizionate sul lato destro.

Le catene montate sul lato sinistro sono fisse mentre quelle di destra sono a posizionamento variabile, essendo in grado di traslare di 150 mm sul piano orizzontale. Tale soluzione, ottenuta incernierando le suddette catene a braccetti snodati abbinati a molle in acciaio (foto 31), consente al sistema di trasporto di adattarsi ai diversi diametri delle piante e alla naturale rastremazione dei fusti.



Foto 30 – Particolare del dispositivo di convogliamento. È possibile notare la posizione avanzata della catena gommata situata sul lato destro.



Foto 31 – Dispositivo di trasporto inferiore. Sono visibili i braccetti snodati con molle ad elevata resistenza a compressione.

Il dispositivo di trasporto è configurato in maniera tale da rilasciare le piante prima dalla parte basale e, successivamente, dalla parte apicale, grazie alla diversa lunghezza delle catene e al diverso posizionamento delle stesse sui due piani di riferimento. Questo accorgimento fornisce la giusta inclinazione alla pianta per la successiva deposizione in andana. Terminata la fase di trasporto la parte basale della pianta arriva a fine corsa mentre la parte apicale cade nell'interfila, guidata lateralmente da due profilati in metallo. Le catene posizionate sul lato sinistro sono dotate di 41 tasselli gommati ed hanno una lunghezza di trasporto di 2070 mm. Le catene posizionate sul lato destro, invece, hanno una lunghezza diversa: la catena inferiore è dotata di 40 tasselli gommati e ha una lunghezza di trasporto di 2030 mm, quella superiore è dotata di 46 tasselli gommati ed ha una lunghezza di trasporto di 2300 mm.

Le gomme montate sulle catene hanno sezione semicircolare, con un'altezza e una larghezza pari, rispettivamente, a 80 mm e 83 mm (foto 32). Ciascuna gomma è stata tornita in posizione centrale per consentire l'inserimento di un supporto in metallo atto a collegare, mediante saldatura, le singole gomme alle catene di trasporto. La distanza minima tra le gomme è di 20 mm, tale distanza aumenta fino a 60 mm nel passaggio sulle corone.

Tutte le corone montate sulla macchina sono da 10 denti mentre le catene hanno un passo di 49 mm (spessore della maglia di guida 15 mm) e sono protette lateralmente da un lamierino dello spessore di 1,20 mm.



Foto 32 – Particolare delle gomme montate sulle catene di trasporto.

Testata pick up per falciatrinciacaricatrice Spapperi modello RT

La testata pick up è stata progettata allo scopo di consentire la raccolta del pioppo biennale andanato con la falciatrinciacaricatrice Spapperi RT. Il dispositivo pick up raccoglie le piante da terra sollevandone i calci, mentre il moto di avanzamento della trattrice e il dispositivo di convogliamento (costituito da due coppie di rulli dentati ad asse verticale) favoriscono l'introduzione delle stesse verso i rulli di alimentazione.

Il dispositivo raccoglitore è costituito da un pick up rotativo cilindrico del diametro e lunghezza pari rispettivamente a 110 mm e 1690 mm, dotato di quattro rilievi in acciaio dello spessore ed altezza di 10 mm e 30 mm, che svolgono la funzione di presa e sollevamento dei calci delle piante.

L'asse di rotazione del pick up dista 540 mm dal sistema di alimentazione, con uno spazio utile allo scarico di eventuale materiale estraneo di 465 mm (foto 33).

Il moto rotativo del pick up è derivato da una pompa idraulica posizionata sul lato sinistro e protetta da un carter in metallo. Una valvola consente di regolarne la velocità di

rotazione in base alla velocità di avanzamento della macchina e al quantitativo di biomassa presente sul terreno.

Un sistema autolivellante “folle”, montato sui due lati del pick up, garantisce il contatto tra il dispositivo raccoglitore e il terreno, assecondandone le irregolarità.



Foto 33 – Testata pick up. Sono visibili il pick up rotativo con i due dispositivi laterali per l’autolivellamento, i rulli verticali di convogliamento e i rulli di alimentazione ad asse orizzontale.

Sviluppo di innovazioni tecnologiche dedicate alle piantagioni da biomassa a ciclo quinquennale

Macchina trapiantatrice di astoni

Il prototipo è stato progettato al fine di agevolare la costituzione di impianti di pioppo a ciclo quinquennale. La macchina, realizzata su un telaio semi portato collegato all’attacco a tre punti di un trattore, è costituita da due cassette per il contenimento degli astoni, da una serie di organi per l’apertura e la chiusura del solco nel terreno e da un dispositivo per il trasporto e la deposizione del materiale di propagazione nel terreno (figura 6).

La trapiantatrice ha un ingombro esterno in fase di lavoro di 2240 mm in larghezza e 3550 mm in lunghezza ed è stata realizzata con telaio tubolare portante 100 mm x 100 mm (spessore 6 mm).

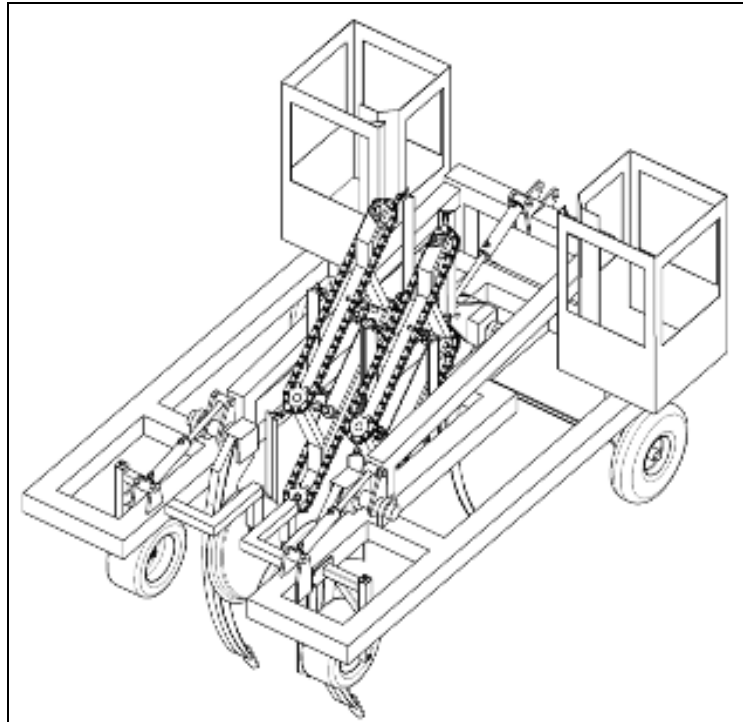


Figura 6 – Vista 3d del prototipo di macchina trapiantatrice di astoni.

L'operatrice esegue in sequenza le seguenti operazioni:

- apertura del solco nel terreno;
- trasporto e deposizione dell'astone nel fondo del solco;
- chiusura del solco;
- rincalzatura.

I solchi, profondi 800 mm, vengono aperti da un ripper collocato in posizione avanzata rispetto agli altri organi e dispositivi. Due paratie in metallo della lunghezza di 1270 mm sono state saldate dietro il ripper allo scopo di evitare la ricaduta del terreno in fondo al solco (figura 7).

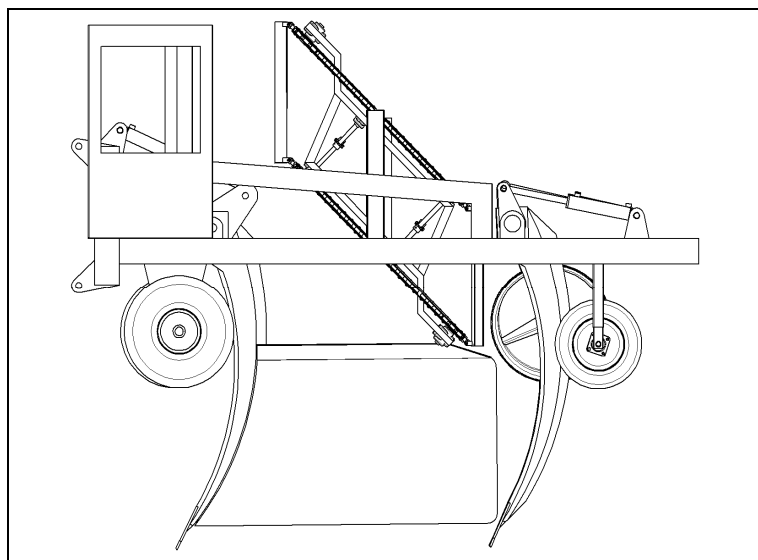


Figura 7 – Vista laterale del prototipo di macchina trapiantatrice di astoni.

Il sistema di trasporto e deposizione degli astoni (figura 8) risulta costituito da due coppie di catene controrotanti ad andamento obliquo (inclinazione 40° rispetto al piano orizzontale), una superiore (figura 8 particolare A) ed una inferiore (figura 8 particolare B), distanti tra loro 320 mm sul piano orizzontale e 645 mm sul piano verticale (figure 9).

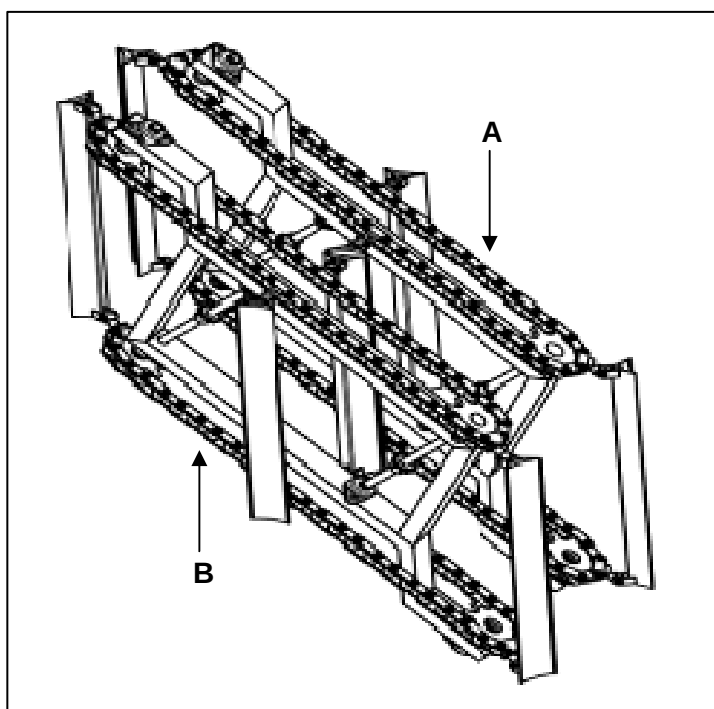


Figura 8 – Rappresentazione 3D del sistema di trasporto degli astoni.

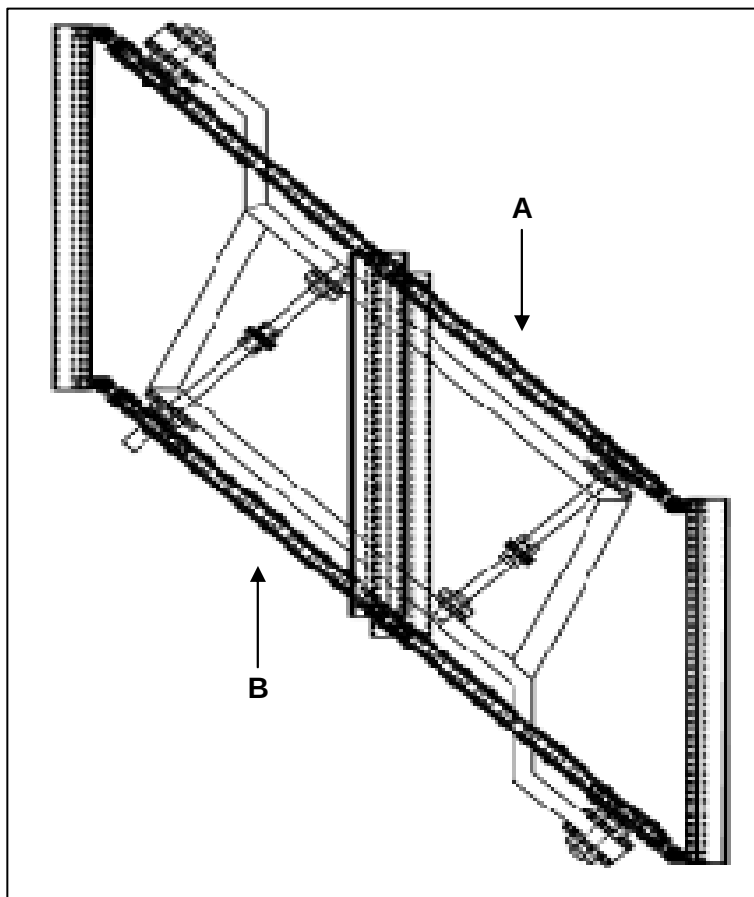


Figura 9 – Vista laterale del sistema di trasporto degli astoni.

Le catene (figura 10), abbinate a coppie di pinzette snodabili (figura 10 particolari A e B), ruotano attorno a corone da 8 denti del diametro di 150 mm.

Le pinze, incrociandosi tra loro nella traiettoria interna (figura 10 particolari B e C), prelevano il materiale e lo trasportano in fondo al solco trattenendolo fino a quando la loro traiettoria non diventa esterna (figura 10 particolare D). Il trasporto degli astoni avviene contemporaneamente su due livelli, uno orizzontale ed uno verticale, coprendo rispettivamente una distanza di 750 mm e 780 mm.

Il dispositivo di trasporto deriva il proprio moto da una delle due ruote di appoggio, tramite una trasmissione meccanica abbinata ad una doppia scatola di rinvio con alberi cardanici, il tutto sincronizzato affinché il materiale venga rilasciato ad intervalli regolari di due metri.

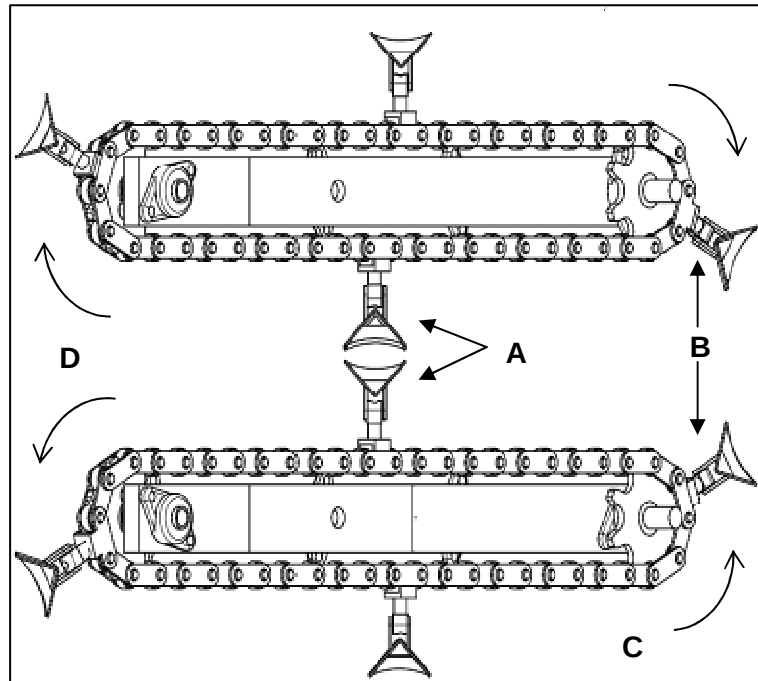


Figura 10 – Vista dall’alto del sistema di prelievo e rilascio degli astoni.

Un operatore preleva gli astoni posizionati in un contenitore laterale e li inserisce in un apposito alloggiamento frontale. L’astone viene quindi prelevato dalle due coppie di pinze e trasportato verticalmente in fondo al solco.

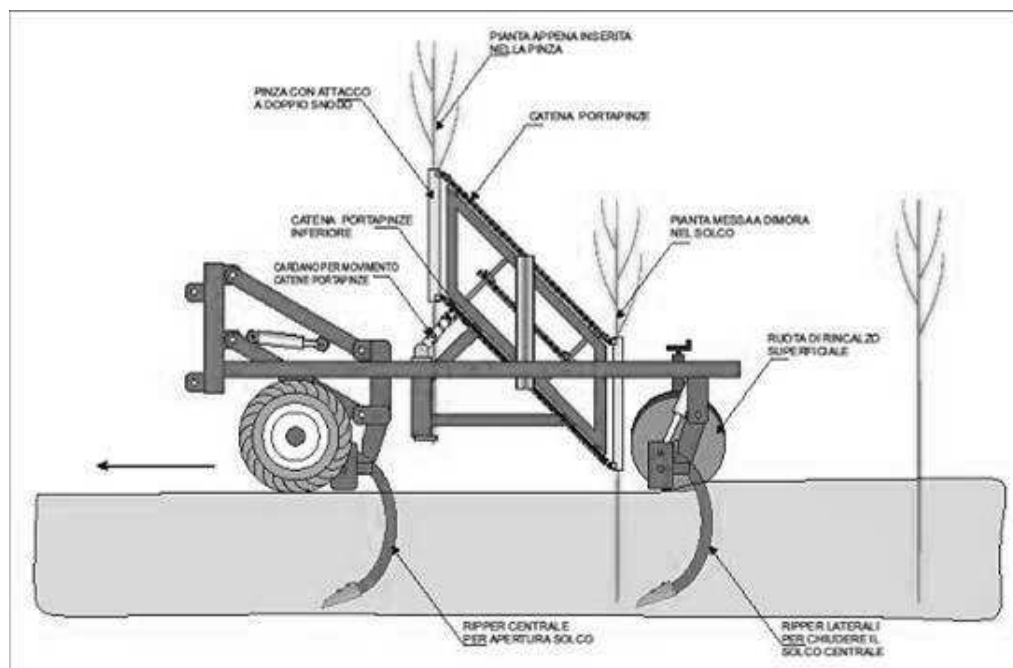


Figura 11 – Schema di funzionamento della trapiantatrice di astoni.

La chiusura del taglio avviene subito dopo la deposizione dell'astone su due diversi livelli (figura 11):

- a 510 mm di profondità, grazie all'azione di due ancore lunghe 810 mm e distanti ciascuna 285 mm dal centro del solco;
- in superficie, grazie ad una coppia di ruotini rinalzatori chiudi solco (diametro e spessore pari rispettivamente a 610 e 150 mm), che operano con angolazione variabile in funzione delle caratteristiche del terreno.

Tre martinetti idraulici consentono il sollevamento retrattile del ripper e delle due ancore, consentendo il trasporto della macchina su strada e in campo. Il sistema idraulico consente di regolare anche la profondità di lavoro.

Una coppia di ruotini in metallo, dello spessore di 200 mm e del diametro di 420 mm, sostengono infine la macchina in fase di lavoro.

Macchina abbattitrice andanatrice di pioppo quinquennale

Il prototipo (figura 12) è semiportato in posizione latero - posteriore da una trattrice della potenza minima di 95 kW, zavorrata anteriormente di 0,5 tonnellate (tabella 5). La macchina, con massa complessiva di 2046 kg ed ingombro esterno, in fase di lavoro, di 3210 mm di larghezza e 3600 mm di lunghezza, monta su un telaio di profilati metallici un sistema di taglio e una doppia pinza a posizionamento variabile.

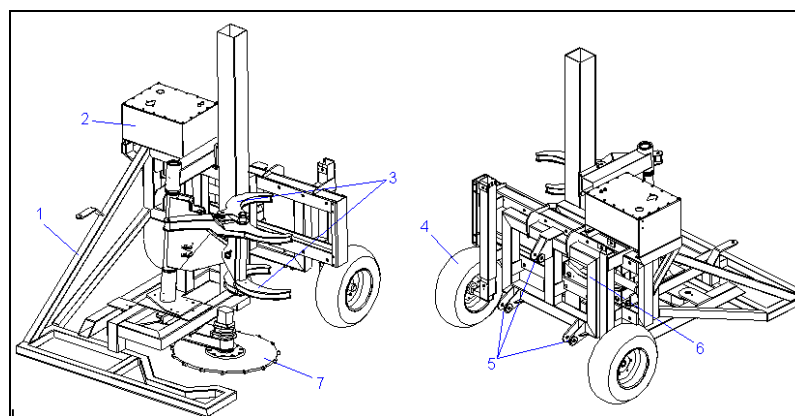


Figura 12 – Macchina abbattitrice andanatrice per pioppo quinquennale: 1) telaio mobile; 2) serbatoio olio idraulico; 3) pinze; 4) ruote di appoggio; 5) attacco a tre punti; 6) telaio fisso; 7) lama di taglio.

Tabella 5 - Caratteristiche tecniche dell'abbattitrice andanatrice per pioppo quinquennale.

Descrizione	Unità di misura	Valore
Dimensioni in fase di lavoro (larghezza e lunghezza)	mm	3210 x 3600
Dimensioni in fase di trasporto (larghezza e lunghezza)	mm	2350 x 3600
Altezza massima	mm	2800
Massa complessiva	kg	2046
Pneumatici		205/65/15
Sistema di taglio		
Diametro del disco	mm	1000
Spessore del disco	mm	12
Denti	N°	36
Velocità di rotazione	giri/min	2200
Altezza minima di taglio	mm	50
Doppia pinza a posizionamento variabile		
Bracci	N°	2
Ampiezza di presa sul tronco	mm	795
Fasi di lavoro: presa, sollevamento, trasporto, inclinazione, scarico, ritorno in posizione originale.		

Il dispositivo di taglio è costituito da una lama circolare (diametro 1000 mm e spessore 12 mm) con 36 denti profondi 30 mm. I denti sono spaziati fra loro di 88 mm e sono forniti di supporto indurito al cromo. La lama deriva il proprio moto dalla presa di potenza del trattore attraverso un rinvio che ne moltiplica il numero di giri, in modo che la lama possa operare a 2200 giri/min. Il disco è montato su un supporto mobile, abbinato ad una molla ad intensità regolabile ed un tirante. Ciò permette di assorbire parte degli sforzi che si registrano durante la fase di taglio e che altrimenti sarebbero a carico della struttura portante. Due ruote folli sostengono la macchina in fase di lavoro, permettendo di regolare l'altezza di taglio grazie all'azione di due martinetti idraulici (altezza minima di taglio 50 mm).

La doppia pinza è costituita da quattro elementi parzialmente sovrapponibili, due superiori e due inferiori, con un'ampiezza di presa sul tronco di 795 mm.

Il dispositivo si collega, tramite un telaio in acciaio, ad una colonna portante girevole del diametro di 100 mm. La pinza, ruotando intorno a tale asse, compie le seguenti fasi di lavoro: presa, sollevamento, trasporto, inclinazione, scarico e ritorno in posizione.

Durante la fase di avanzamento un dispositivo tastatore, montato tra gli elementi di presa, urta contro la pianta azionando la chiusura della pinza (figura 13 particolare A) e il conseguente bloccaggio della pianta (figura 13 particolare B). Durante la fase di taglio la doppia pinza solleva leggermente il tronco effettuando, tramite rotazione attorno alla colonna portante, il trasporto e il rilascio della pianta nell'interfila (figura 13 particolare C). Le piante vengono fatte cadere in posizione parallela a quella di avanzamento ma in direzione opposta (figura 13 particolare D). Terminato il ciclo la pinza ritorna nella posizione di partenza al fine di operare sulla pianta successiva.

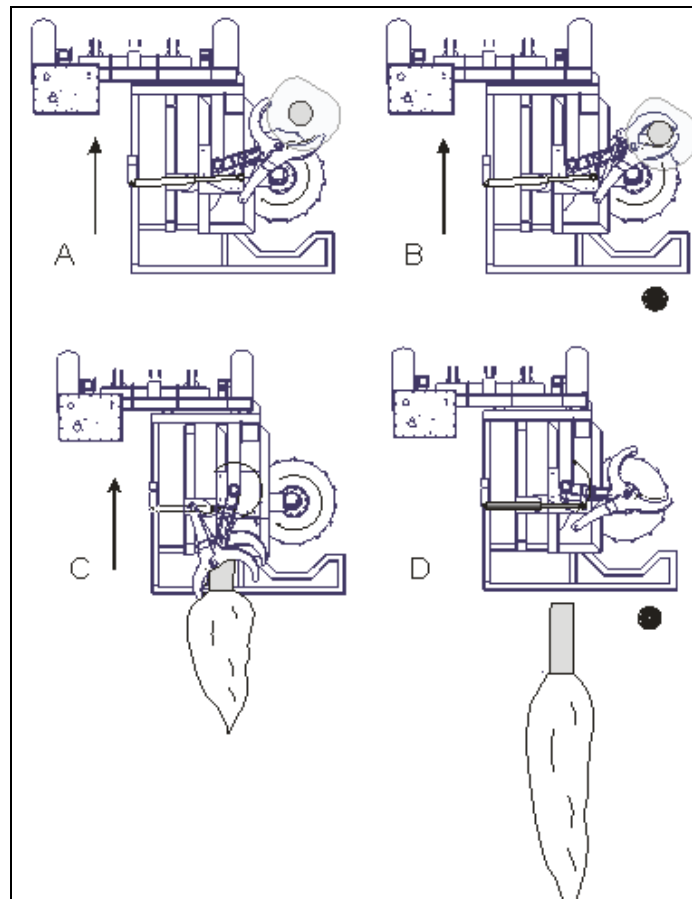


Figura 13 – Macchina abbattitrice andanatrice di pioppo quinquennale in fase di lavoro: A) intercettazione; B) presa e sollevamento; C) inclinazione e rilascio; D) ritorno in posizione di partenza.

Il dispositivo di taglio e la pinza sono in grado di traslare lateralmente per una lunghezza di 860 mm rispetto al corpo principale della macchina, passando dalla configurazione da trasporto a quella da lavoro (figura 14).

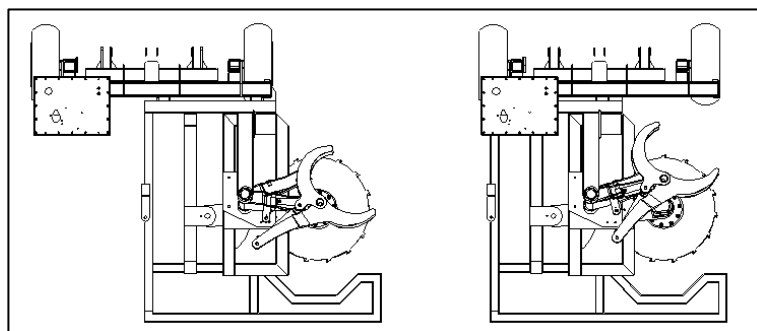


Figura 14– Configurazioni da trasporto e da lavoro. La macchina è in grado di traslare lateralmente di 860 mm.

Macchina semovente con testata pick up

La macchina (figura 15) è azionata da un motore endotermico diesel IVECO FPT (Fiat Powertrain Technologies) di 8,7 litri, con 6 cilindri in linea e una potenza massima di 260 kW (354 Cv) a 2100 g/min (coppia massima 1500 Nm a 1400 giri /min). La semovente equipaggia un sistema di trazione integrale 4X4 su ponti rigidi (cambio meccanico a due velocità), collegati tra loro con albero cardanico. Il motore è collegato ad un accoppiatore a tre uscite della Twin Disk, posto ventralmente alla macchina. L'uscita centrale fornisce, tramite una frizione idraulica ed un riduttore di velocità, il moto alla presa di forza posta frontalmente alla semovente (che a sua volta azionerà il dispositivo cippatore). In una delle due uscite laterali è inserita una pompa della LINDE, a circuito chiuso e cilindrata variabile (75,9 cc max), comandata meccanicamente con servocomando e con taratura delle valvole di massima da 420 bar e potenza massima trasmissibile di 157 kW (213 Cv). La pompa è collegata ad un motore idraulico della Comer Industries di uguale cilindrata, flangiato meccanicamente ad uno dei due ponti rigidi per la trasmissione del moto alle ruote. L'altra uscita è collegata ad una ulteriore pompa idraulica, per i servizi e le utenze della semovente (sollevamento dei bracci di collegamento della testata, azionamento dei cilindri per il ribaltamento del cassone ecc.). La macchina è equipaggiata con quattro ruote isodiametriche e monta pneumatici 500/18 R22,5. Un comando elettrico posto in cabina consente di avere le seguenti possibilità di guida:

- a) ruote anteriori sterzanti e posteriori fisse,
- b) quattro ruote sterzanti,
- c) spostamento laterale della trattrice (movimento a granchio).

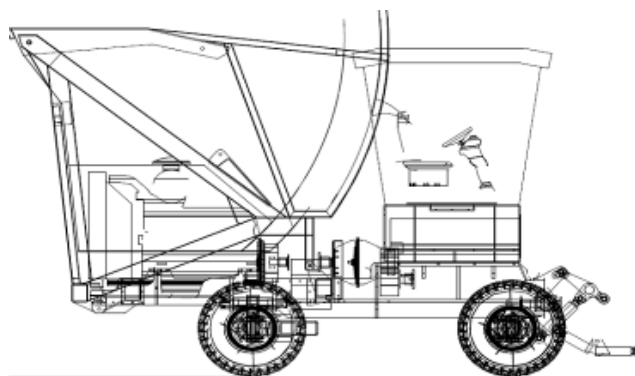


Figura 15 - Macchina semovente.

La macchina ha una lunghezza, una larghezza e un'altezza massima pari, rispettivamente, a 6390 mm, 2510 mm e 3910 mm, con un peso complessivo di 9250 kg (tabella 6). Il serbatoio del gasolio contiene circa 300 litri di carburante. Il prototipo è dotato di un sistema di guida reversibile e monta un cassone ribaltabile da 15,7 m³, incernierato sul telaio esterno ad un'altezza di 3910 mm.

Tabella 6 - Dati tecnici del prototipo di macchina semovente.

Dati tecnici della semovente		
Motore	tipo	FTP Iveco C87
Cilindri	n.°	6 in linea
Potenza motore	kW	260
Cilindrata	L	8,7
Serbatoio carburante	L	300
Lunghezza complessiva	mm	6390
Larghezza complessiva	mm	2510
Altezza massima da terra	mm	3910
Massa (comprensiva del cassone posteriore)	kg	9250
Pneumatici		500/18 R22,5
Dati tecnici del cassone posteriore		
Volume	m ³	15,7
Altezza massima	mm	2796
Lunghezza massima	mm	3783
Larghezza massima	mm	2500
Massa	kg	800

La parte anteriore della macchina è equipaggiata con la presa di forza e con due bracci per il collegamento all'organo di cippatura ed alla testata di raccolta delle colture energetiche.

L'apparato trinciante abbinato alla testata pick up è stato progettato per cippare piante fino a un diametro massimo di 380 mm. È costituito da un disco del diametro e spessore pari rispettivamente a 1600 mm e 60 mm ed è collegato direttamente alla p.d.p. con un cardano.

Due coltelli radiali effettuano il taglio del prodotto grazie all'azione di un contro coltello fisso. La velocità di rotazione del disco in fase di taglio è di 1000 giri/min e la presenza di apposite palette posteriori provvede a generare il flusso d'aria centrifugo necessario al trasporto pneumatico del prodotto trinciato lungo un tubo di lancio. Il gruppo cippatore è stato concepito come modulo indipendente in modo da poter essere abbinato a diverse testate (figura 16).

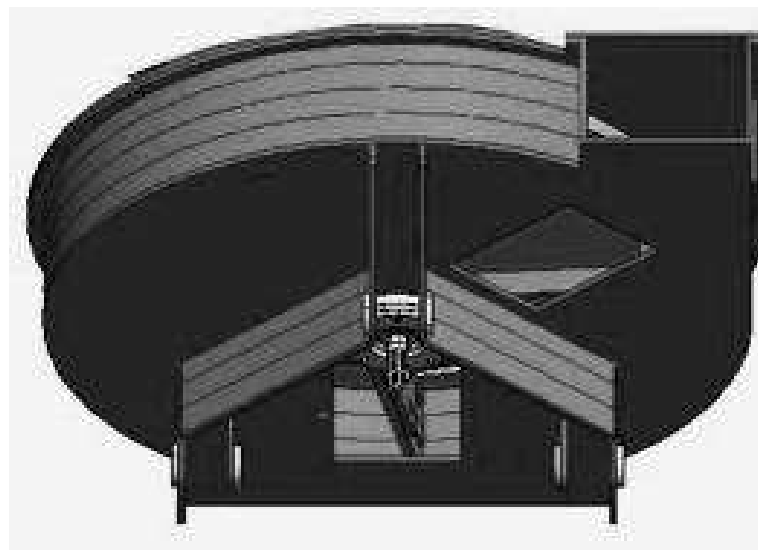


Figura 16 - Vista posteriore del gruppo cippatore.

La testata pick up (figura 17) consente di effettuare la raccolta e la cippatura delle piante abbattute e andanate secondo il sistema di raccolta in due fasi (sia biennali che quinquennali).

La testata è dotata di un dispositivo raccoglitore, di un sistema di convogliamento e di un sistema di alimentazione del cippatore. Il pick up è costituito da un cilindro del diametro e

lunghezza pari rispettivamente a 155 mm e 1750 mm, dotato di 105 rilievi in acciaio lunghi 70 mm. Questi ultimi svolgono le funzioni di presa e sollevamento dei calci delle piante. L'asse di rotazione del pick up dista 820 mm dal sistema di alimentazione della cippatrice, con uno spazio utile allo scarico di eventuale materiale estraneo di 370 mm.

Il sistema di convogliamento è composto da due serie di tre rulli rotanti verticali dentati, ciascuno del diametro e altezza di 250 mm e 700 mm. Il sistema di alimentazione è costituito infine da due rulli dentati verticali, uno fisso e l'altro mobile. La posizione di quest'ultimo varia in funzione della dimensione del prodotto in entrata.

Un sistema autolivellante "idraulico", montato sui due lati del pick up, garantisce il contatto tra il dispositivo raccoglitore e il terreno, assecondandone le irregolarità.

Il moto rotativo del pick up è derivato da una pompa idraulica posizionata sul lato sinistro e protetta da un carter in metallo. Una valvola consente di regolarne la velocità di rotazione in base alla velocità di avanzamento della macchina e al quantitativo di biomassa presente sul terreno.

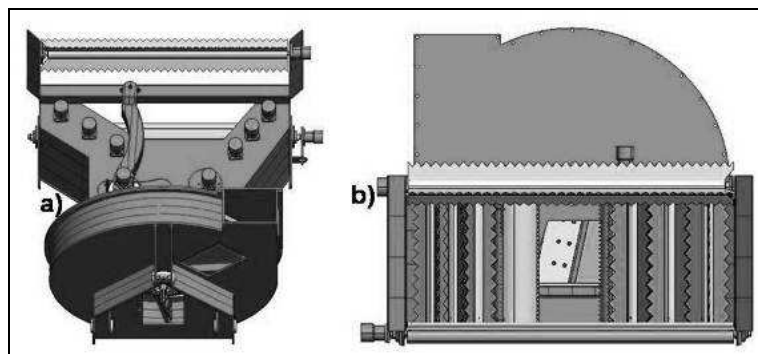


Figura 17 - Testata pick up collegata al disposto cippatore.

La semovente equipaggiata con testata pick up è in grado di avanzare lungo le interfile, sollevare i calci delle piante dal terreno, cippare la biomassa e scaricare il cippato sui rimorchi trainati dalle trattrici o sul cassone posteriore della semovente stessa.

Prove in campo, prestazioni e qualità del lavoro svolto dalle macchine sviluppate per le piantagioni di pioppo a ciclo biennale

Dispositivo automatico di alimentazione delle talee

Le prove volte a verificare l'efficienza del nuovo dispositivo sono state eseguite il 18 novembre 2011 (foto 34, 35, 36, 37) in località San Secondo di Città di Castello. Lo studio è stato effettuato su una parcella di circa 270 m², operando su 4 file lunghe 24 m ciascuna. Le talee impiegate (varietà AF2) avevano un diametro di 18 mm e una lunghezza di 200 mm.

Il sistema automatico è stato abbinato ad una ruota di una trapiantatrice bifila trainata da una trattrice New Holland 100 TL da 100 cv.



Foto 34 – Trapiantatrice con dispositivo per l'alimentazione automatica delle talee in fase di lavoro.



Foto 35 – Particolare del sistema di alimentazione e di inserimento delle talee.



Foto 36 – Fase di deposizione della talea nel piano di carico.



Foto 37 – Fase di inserimento della talea nella pinzetta.

Performance della trapiantatrice e qualità del lavoro svolto

I tempi accessori sono risultati costituiti dai tempi per voltate in capezzagna (16,62%) e tempi di manutenzione (2,08%). Non sono stati registrati, invece, tempi di riposo e tempi morti inevitabili. Poiché l'estensione della parcella era tale da non richiedere il rifornimento del materiale di propagazione, il tempo richiesto per tale operazione è stato stimato pari al 6% del tempo standard.

La macchina ha raggiunto una capacità di lavoro operativa di 0,25 ha/h, con una velocità effettiva di avanzamento di 0,33 m/s (tabella 7).

La qualità del lavoro svolto, con particolare riferimento al corretto posizionamento del materiale di propagazione, risulta soddisfacente e in grado di garantire una buona regolarità degli impianti realizzati (foto 38).

Tabella 7 – Ripartizione percentuale dei tempi di lavoro della trapiantatrice automatica di talee e operatività della macchina.

Tempo standard TS		
Tempo effettivo TE	%	75,31
Tempo accessorio TA	%	24,69
- Tempo per voltate TAV	%	16,62
- Tempo per rifornim. o scarichi TAS	%	6
- Tempo per manutenzione TAC	%	2,07
Tempo di riposo TR	%	0
Tempo morto inevitabile TMI	%	0
Tempo standard	min.	6' 25"
Operatività della macchina		
Rendimento operativo Ro	%	75,31
Velocità effettiva ve	m/s	0,33
Velocità operativa vo	m/s	0,21
Capacità di lavoro operativa	ha/h	0,25
Produttività oraria	talee/h	1785



Foto 38 – Messa a dimora delle talee di pioppo.

Abbattitrice andanatrice per pioppo a ciclo biennale

Le performance della macchina abbattitrice andanatrice sono state analizzate nel mese di marzo (2010), operando su quattro impianti di pioppo a ciclo biennale, al primo (R2F2) e al secondo turno di ceduzione (R4F2) (tabella 8). La qualità del lavoro svolto è stata invece valutata nei due impianti al primo turno, rilevando i danni alle ceppaie, l'altezza di taglio e le perdite di prodotto in campo. La macchina è stata abbinata a diverse trattrici della potenza minima di 60 kW (Claas Ares 500, Fiat 90 dt, Case JXC 1095, Deutz Fahr Agroplus 410).

Tabella 8 – Descrizione degli impianti R2F2 E R4F2.

Regione	Em. Romagna		Toscana	Umbria
Località	Ravenna (RA)	Argenta (FE)	Marciano della Chiana (AR)	Città di Castello (PG)
Età della piantagione	R2F2	R2F2	R4F2	R4F2
Superficie impiantata (ha)	6,70	4,10	0,25	0,36
Superficie raccolta (ha)	1	2,35	0,084	0,090
Quota (m s.l.m.)	11	4	320	266
Densità (p/ha)	5702	5666	6666	6666
Distanza tra le file (cm)	300	350	300	300
Distanza sulla fila (cm)	58	50	50	50
Clone	Imp. misto	AF2	AF2	Imp. misto

Caratteristiche morfologiche e produttività degli impianti R2F2 e R4F2

Le piantagioni sono state realizzate secondo le normali pratiche colturali previste e nessuna di esse è stata irrigata.

Gli impianti al primo taglio (R2F2), non avendo subito alcuna ceduzione, si presentavano con un fusto unico mentre quelli al secondo taglio (R4F2) con uno o due fusti principali e due - tre fusti secondari (tabella 9).

Tabella 9 – Principali parametri dendrometrici delle piantagioni R2F2 e R4F2.

Località	Ravenna (RA)	Argenta (FE)	Marc. della Chiana (AR)	Città di Castello (PG)
Ciclo	R2F2	R2F2	R4F2	R4F2
Fusti (n.°)	1	1	4,20±1,7	4,50±0,83
Diametro fusti principali	64,60±13,99	70,66±15,98	60,15±11,07	61,05±13,07
Diametro fusti secondari	-	-	28,13±7,21	25,10±8,12
Altezza fusti principali	5,50±0,88	7,35±0,82	7,01±0,95	7,41±0,88
Altezza fusti secondari			4,04±0,92	4,11±0,77
Produttività (t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹)	6,39	9,80	11,55	11,80

I livelli di produttività rilevati variavano da 6,39 a 11,8 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ e risultavano leggermente maggiori per gli impianti al II taglio. Tali valori non differiscono molto da quelli ottenuti in altre esperienze italiane (Piccioni e Bonari 2006; Minotta e Muzzi 2007). Tra gli impianti al primo taglio quello sito in Argenta evidenziava un diametro medio superiore a quello di Ravenna (70,66 vs 64,60), ma la differenza non risulta statisticamente significativa ($p>0,05$). Differenze statisticamente significative tra i due impianti al primo taglio ($p<0,01$) emergono, invece, in relazione alle altezze medie e al quantitativo medio di biomassa per ceppaia.

Performance dell'abbattitrice andanatrice

La tabella 10 riassume i tempi rilevati durante le operazioni di abbattimento (foto 39). I tempi accessori, in tutti i cantieri analizzati, risultavano costituiti dai tempi per voltate in capezzagna (16,62% e 17,84% per R2F2; 20,73% e 21,19% per R4F2) e tempi di manutenzione dovuti ad ingolfamenti dell'apparato di convogliamento (0,62% e 1,85% per R2F2; 1,51% e 1,55% per R4F2). Non sono stati registrati, invece, tempi di riposo e tempi morti inevitabili.



Foto 39 – Abbattitrice andanatrice in raccolta di pioppo di due anni di radice e due anni di fusto.

Il rendimento operativo è risultato maggiore per gli impianti al primo ciclo di taglio e ciò è da imputare alla diversa lunghezza delle file (mediamente 224 m per gli impianti R2F2 e 140 m per gli impianti R4F2) e alla diversa incidenza delle manovre di voltata sul tempo operativo.

Nel complesso l'efficienza dell'abbattitrice andanatrice è risultata interessante, con una capacità di lavoro operativa superiore a 1,30 ha/h e una produzione oraria operativa compresa tra 40,57 e 81,20 t/h.

Tabella 10 – Ripartizione percentuale dei tempi di lavoro dell'abbattitrice andanatrice e operatività della macchina.

Località		Ravenna (RA) Cantiere 1	Argenta (FE) Cantiere 2	Marc. della Chiana (AR) Cantiere 3	Città di Castello (PG) Cantiere 4
Turno		R2F2	R2F2	R4F2	R4F2
Tempo effettivo	%	82,76	80,31	77,26	77,75
Tempo accessorio	%	17,24	19,69	22,74	22,25
<i>Voltate</i>	%	16,62	17,84	21,19	20,73
<i>Manutenzione</i>	%	0,62	1,85	1,55	1,52
Tempo standard	min.	40' 25"	103' 43"	3' 36"	4' 02"
Performance					
Velocità effettiva	m/s	1,79	1,61	1,61	1,67
Velocità operativa	m/s	1,48	1,29	1,24	1,30
Cap. di lavoro effettiva	ha/h	1,80	1,69	1,73	1,80
Cap. di lavoro operativa	ha/h	1,50	1,36	1,34	1,40
Prod. oraria operativa	t/h	40,57	69,14	73,70	81,20

Qualità del lavoro svolto

Le andane si presentavano regolari e parallele alla direzione di avanzamento della macchina (foto 40), requisito, quest'ultimo, essenziale per la corretta esecuzione della successiva fase di raccolta.

Lo stoccaggio dei fusti nell'interfila consente di ridurre il contenuto di umidità della biomassa in funzione del numero di giorni di stoccaggio. Ad Argenta, l'unico dei quattro impianti sopra menzionati ad essere stato cippato a giugno, le piante si presentavano con un contenuto di umidità del 60,80% in fase di abbattimento e del 32,40% in fase di cippatura, con una riduzione del contenuto di umidità del 28,40% dopo 90 giorni (figura 18).



Foto 40 – Andana di pioppo R2F2.

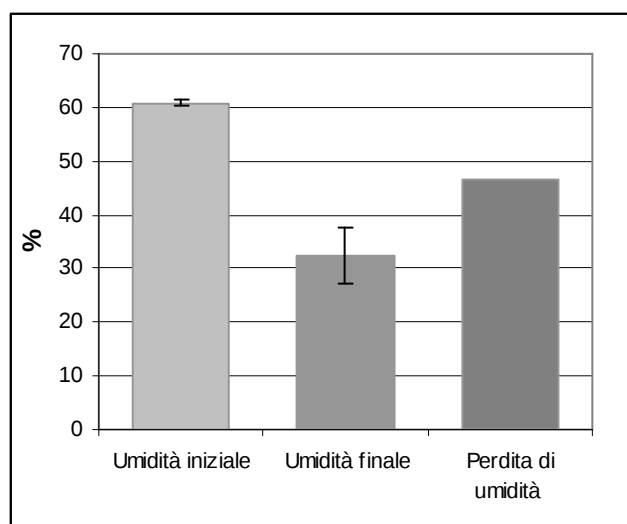


Figura 18 – Percentuale di umidità delle piante fresche e andanate.

L'altezza di taglio è risultata di 85,16 mm (dev. St. $\pm 13,61$) nell'impianto sito in Ravenna e 95,50 mm (dev. St. $\pm 12,75$) nell'impianto sito in Argenta. Tale differenza, risultata statisticamente significativa ($p < 0,01$), può essere imputata alle diverse regolazioni effettuate sulla macchina al fine di consentirne il corretto funzionamento in campo.

Nel cantiere 1 il passaggio della macchina ha prodotto danni da spacco verticale e sfrangiamento di lieve e media entità sul 9,01% delle ceppaie, contro il 6,79% del cantiere 2 (tabella 11). Le perdite di prodotto sono risultate dello 0,80% nel cantiere 1 e dello 0,78% nel cantiere 2 e si riferiscono esclusivamente al materiale non correttamente allineato nell'interfila (difficilmente raccolto dal pick up della falciatrinciacaricatrice).

Tabella 11 – Qualità del lavoro svolto dall'abbattitrice andanatrice.

			<i>Danni da spacco verticale (%)</i>			<i>Danni da sfrangiamento (%)</i>		
			lievi	medi	gravi	lievi	medi	gravi
Cantiere 1	85,16 $\pm 13,61$	<0,01	3,73	1,41	-	2,32	1,55	-
Cantiere 2	95,50 $\pm 12,75$	<0,01	2,55	1,15	0,12	1,21	1,76	-

Trinciacaricatrice Spapperi RT equipaggiata con testata pick up

Le prove di raccolta e cippatura del pioppo andanato sono state condotte nei medesimi quattro impianti a turnazione regolare (R2F2 e R4F2) utilizzati per le prove di abbattimento e andanatura (tabella 9). La raccolta è stata eseguita subito dopo le operazioni di abbattimento, ad eccezione dell'impianto sito in Argenta che è stato raccolto il 10 giugno.

Performance della testata e qualità del lavoro svolto

La raccoglitrice ha mostrato una capacità di lavoro operativa di circa 0,50 ha/h e una produzione oraria operativa compresa tra 13,79 t/h e 26,44 t/h (tabella 12).

Le perdite di prodotto rappresentano, mediamente, il 2,30% del prodotto andanato e possono essere attribuite in parte al lavoro svolto dall'abbattitrice (fusti non correttamente allineati nell'interfila) e in parte al lavoro svolto dalla raccoglitrice (fusti non sollevati da terra dal dispositivo pick up). Il danneggiamento accidentale delle ceppaie può essere considerato trascurabile e direttamente connesso all'abilità del trattorista.

Tabella 12 – Ripartizione percentuale dei tempi di lavoro della cippatrice RT con testata pick up e operatività della macchina.

Località		Ravenna (RA)	Argenta (FE)	Marc. della Chiana (AR)	Città di Castello (PG)
Turno		R2F2	R2F2	R4F2	R4F2
Tempo effettivo	%	79,11	79,90	82,19	79,62
Tempo accessorio	%	20,89	20,10	17,81	20,38
<i>Voltate</i>	%	13,28	15,18	15,07	14,81
<i>Manutenzione</i>	%	7,61	4,92	2,74	5,57
Tempo standard	min.	120' 29"	271' 12"	12' 17"	10' 35"
Performance					
Velocità effettiva	m/s	0,62	0,62	0,47	0,60
Velocità operativa	m/s	0,49	0,49	0,39	0,48
Capacità di lavoro effettiva	ha/h	0,63	0,65	0,50	0,65
Capacità di lavoro operativa	ha/h	0,50	0,52	0,41	0,51
Produzione oraria operativa	t/h	13,79	26,44	17,50	21,27

Prove in campo, prestazioni e qualità del lavoro svolto dalle macchine dedicate alle piantagioni di pioppo a ciclo quinquennale

Macchina trapiantatrice di astoni

Le prove di trapianto sono state condotte nel mese di novembre 2011 su una parcella di circa 600 m² (foto 41, 42, 43, 44), ponendo a dimora astoni di pioppo della varietà AF2, del diametro di 25 mm e altezza di 2000 mm. Il prototipo è stato abbinato ad una trattrice John Deere 6530 della potenza di 135 cv.



Foto 41 – Macchina in fase di trasporto. I dispositivi di lavoro sono in posizione retratta.



Foto 42 –Posizionamento dell’astone nell’apposito alloggiamento frontale.



Foto 43 – Macchina in fase di lavoro.



Foto 44 – Fase di trasporto dell'astone in fondo al solco.

Performance della trapiantatrice e qualità del lavoro svolto

I tempi accessori sono risultati costituiti dai tempi per voltate in capezzagna (19,82%) e tempi di manutenzione (1,98%). Non sono stati registrati, invece, tempi di riposo e tempi morti inevitabili. Poiché l'estensione della parcella era tale da non richiedere il rifornimento del materiale di propagazione, il tempo richiesto per tale operazione è stato stimato pari al 6% del tempo standard.

La macchina ha raggiunto una capacità di lavoro operativa di 0,30 ha/h con una velocità effettiva di avanzamento di 0,35 m/s (tabella 13).

Tabella 13 – Ripartizione percentuale dei tempi di lavoro della trapiantatrice semiautomatica di astoni e operatività della macchina.

Tempo standard TS		
Tempo effettivo TE	%	72,20
Tempo accessorio TA	%	27,80
- Tempo per voltate TAV	%	19,82
- Tempo per rifornim. o scarichi TAS	%	6
- Tempo per manutenzione TAC	%	1,98
Tempo di riposo TR	%	0
Tempo morto inevitabile TMI	%	0
Tempo standard	min	11' 42"
Operatività della macchina		
Rendimento operativo Ro	%	72,20
Velocità effettiva ve	m/s	0,35
Velocità operativa vo	m/s	0,25
Capacità di lavoro operativa	ha/h	0,30
Produttività oraria	astoni/h	509

La qualità del lavoro svolto, con particolare riferimento al corretto posizionamento del materiale di propagazione, risulta soddisfacente e in grado di garantire una buona regolarità degli impianti che dovranno essere realizzati (foto 45). Questo aspetto risulta estremamente importante ai fini della successiva fase di abbattimento, in quanto

l'abbattitrice andanatrice sviluppata per il pioppo quinquennale necessita di una perfetta verticalità della porzione basale del fusto.



Foto 45 – Astoni impiantati.

Abbattitrice andanatrice e cippatrice semovente per pioppo quinquennale

Le prove di abbattimento e cippatura sono state effettuate nel Dicembre 2011 nel comune di Savigliano (CN), operando su un impianto di pioppo quinquennale al primo intervento di taglio (tabella 14, foto 46).

Tabella 14 – Descrizione del sito.

Regione	Piemonte
Località	Savigliano (CN)
Età del pioppeto	R5F5
Superficie netta (ha)	0,95
Quota (m s.l.m.)	327
Sesto di impianto (m)	3 x 2
Densità di impianto (p ha ⁻¹)	1666
Clone	Monviso



Foto 46 – Pioppo quinquennale al primo intervento di taglio.

Caratteristiche morfologiche della piantagione e produttività

La piantagione, di forma rettangolare, si estendeva su una superficie di 1,05 ha (superficie netta 0,96 ha) e comprendeva 21 filari lunghi mediamente 160 m. Le macchine sono state testate su un'area di 1440 m², operando l'abbattimento e la cippatura di tre file. I rilievi hanno evidenziato una percentuale di fallanze dell'1,40%, con una densità effettiva di 1642 piante/ha.

Le piante avevano un'altezza e un diametro medio di 18,60 m (dev. st. $\pm 1,74$) e 189 mm (dev. st. $\pm 30,06$), mentre il diametro massimo registrato nell'impianto era di 240 mm. La biomassa raccogliabile, infine, è risultata di 198 t/ha (contenuto di umidità 57,65%) (tabella 15).

Tabella 15 – Caratteristiche dendrometriche dell'impianto.

Fallanze (%)	1,40
Densità effettiva (p/ha)	1642
Diametro (mm $\pm$ dev.st.)	189 $\pm$ 30,06
Altezza (m $\pm$ dev.st.)	18,60 $\pm$ 1,74
Biomassa fresca (t /ha)	198
Contenuto di umidità (%)	57,65
Biomassa (t s.s./ha)	83,85

Operatività e qualità del lavoro svolto dalle macchine

In tabella 16 sono riportati i tempi registrati durante le prove di raccolta.

Tabella 16 - Ripartizione percentuale dei tempi di lavoro dell'abbattitrice andanatrice, della cippatrice semovente e operatività delle macchine.

		Abbattitrice andanatrice	Cippatrice semovente
Tempo effettivo	%	86,24	90,32
Tempo accessorio	%	13,76	9,68
<i>Voltate</i>	%	4,36	6,19
<i>Manutenzione</i>	%	9,40	3,49
Tempo standard	min.	38' 39"	48' 11"
Performance			
Velocità effettiva	m/s	0,24	0,18
Velocità operative	m/s	0,21	0,17
Capacità di lavoro effettiva	ha/h	0,26	0,20
Capacità di lavoro operativa	ha/h	0,22	0,18
Produzione oraria operativa	t/h	44	35

L'abbattitrice andanatrice (foto 47, 48, 49 e 50), lavorando ad una velocità di 0,24 m/s (0,86 km/h) ha raggiunto una capacità di lavoro operativa di 0,22 ha/h e una produzione oraria operativa di 44 t/h.



Foto 47 – Prototipo in fase di avvicinamento alla pianta.



Foto 48 – Prototipo durante la fase di presa e taglio della pianta.



Foto 49 – Prototipo durante la fase di rilascio della pianta in andana.



Foto 50 – Pioppo quinquennale andanato.

La semovente (foto 51 e 52), invece, lavorando ad una velocità di 0,18 m/s (0,66 km/h) ha raggiunto una capacità di lavoro operativa di 0,18 ha/h e una produzione oraria operativa di 35 t/h.

In entrambi i cantieri non sono stati registrati tempi di riposo e tempi morti inevitabili, mentre il tempo accessorio è risultato costituito dai tempi per voltate in capezzagna (4,36% per l'abbattitrice e 6,19% per la semovente) e tempi di manutenzione (9,40% per l'abbattitrice e 3,49% per la semovente).



Foto 51 – Cantiere di raccolta e cippatura con scarico nel cassone posteriore.



Foto 52 – Cantiere di raccolta e cippatura in parallelo.

L'abbattitrice ha effettuato il taglio ad un'altezza di 119,30 mm (dev. st. $\pm 17,13$ mm) provocando danni da sfrangiamento e spacco verticale sul 58% delle ceppaie (tabella 17). L'elevato numero di ceppaie danneggiate può essere messo in relazione con la non perfetta sincronizzazione della fase di taglio con la fase di trasporto, con quest'ultima che avveniva in determinate condizioni in anticipo rispetto al completo taglio della pianta.

Il 3% delle piante abbattute non sono state deposte in modo corretto mentre il 97% risultava allineato parallelamente alla direzione di avanzamento della trattrice. Il prodotto andanato, considerando le ramificazioni principali e secondarie, aveva un'altezza e una larghezza di 1,25 m (dev. st. $\pm 0,22$) e 2,90 m (dev. st. $\pm 0,49$).

La cippatrice semovente è risultata in grado di raccogliere il 99,15% della biomassa andanata, lasciando sul terreno un quantitativo di prodotto allo 0,85% del totale (1,68 tonnellate).

Tabella 17 – Qualità del lavoro svolto dall'abbattitrice andanatrice.

Altezza di taglio (mm)	Danni da spacco verticale (%)			Danni da sfrangiamento (%)		
	<i>lievi</i>	<i>medi</i>	<i>gravi</i>	<i>lievi</i>	<i>Medi</i>	<i>gravi</i>
119,30 ±17,13	13	12	5	18	9	1

Il cippato ottenuto aveva una massa volumica apparente di 293,60 kg/m³ (dev. st. ±12,48) e un contenuto di umidità del 57,65%.

La maggior parte del cippato risulta concentrato nelle classi 8-16 mm e 16-45 mm, rispettivamente per il 43,28% e 32,90% (categoria commerciale P45). Assenti, invece, impurità e sovra misure (figura 19).

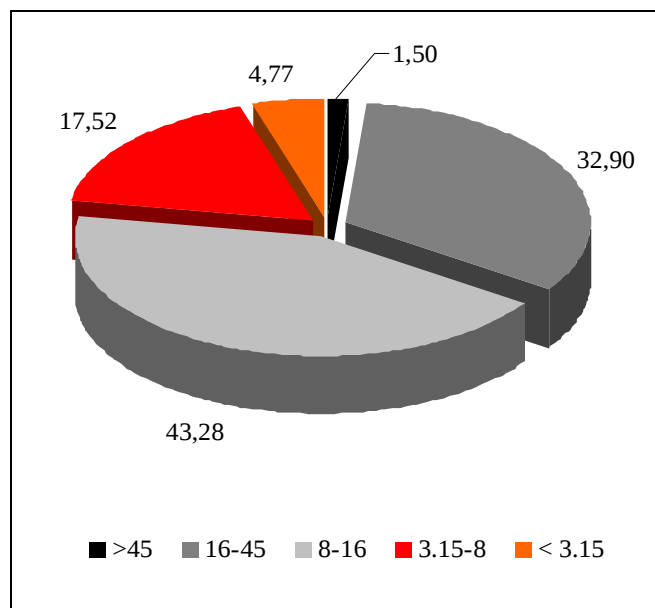


Figura 19 - Ripartizione granulometrica del cippato.

Approfondimenti

Limiti operativi della macchina abbattitrice andanatrice per pioppo biennale

I limiti operativi e il campo di applicabilità della macchina abbattitrice andanatrice sono stati valutati su tre impianti fuori turno, caratterizzati da un diverso livello di accrescimento e produttività (tabella 18). L'impianto con tre anni di radice e un anno di fusto (R3F1) si presentava con un elevato numero di fusticini (circa 5), di diametro compreso tra 27,50 mm (dev. st. $\pm 6,02$) e 16,45 mm (dev. st. $\pm 7,39$) rispettivamente per i polloni principali e i polloni secondari. Date le ridotte dimensioni delle piante anche la produttività dell'impianto è risultata piuttosto bassa e di poco superiore alle 5 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹. L'impianto R3F3 si caratterizzava per la presenza di piante di maggiori dimensioni rispetto a quelle presenti nell'impianto R5F3, con diametro medio di 108,50 mm ($\pm 32,27$) e altezza media di 11,50 m. L'impianto R5F3 si presentava, invece, con polloni principali del diametro medio di 88,96 mm ($\pm 15,09$) e altezza media di 9,48 m ($\pm 1,42$), e polloni secondari del diametro medio di 51,82 mm ($\pm 14,90$) e altezza media di 5,90 m ($\pm 1,65$). La produttività dell'impianto R5F3, tuttavia, è risultata sensibilmente maggiore dell'impianto R3F3 e ciò è da ricondurre al maggior numero di fusti e al maggior quantitativo di biomassa per ceppaia (20,42 vs 17,76 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹).

Tabella 18 - Principali parametri dendrometrici delle piantagioni fuori turno.

Località	Città di Castello (PG)	Montagnana (PD)	Codevigo (PD)
Ciclo	R3F1	R3F3	R5F3
Fusti (n.°)	5	1	3
Diametro fusti principali (mm)	27,50 $\pm$ 6,02	108,50 $\pm$ 32,27	88,96 $\pm$ 15,09
Diametro fusti secondari (mm)	16,45 $\pm$ 7,39	-	51,82 $\pm$ 14,90
Altezza fusti principali (m)	4,19 $\pm$ 0,69	11,50 $\pm$ 1,22	9,48 $\pm$ 1,42
Altezza fusti secondari (m)	2,88 $\pm$ 1,12	-	5,90 $\pm$ 1,65
Produttività (t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹)	5,50	17,76	20,42

Prove di raccolta

I dati rilevati nel corso delle prove hanno evidenziato capacità di lavoro operative pari a 1,80 ha/h, 0,30 ha/h e 0,18 ha/h rispettivamente per gli impianti R3F1, R3F3 e R5F3. La prima prova è stata effettuata sull'impianto di tre anni di radice e un anno di fusto e, nonostante la scarsa lignificazione, l'elevata elasticità e i diametri molto piccoli, l'abbattitrice andanatrice si è dimostrata capace di operare efficientemente in tali condizioni, provvedendo ad eseguire in maniera corretta le fasi di taglio e andanatura.

Le prove condotte sugli impianti R3F3 (foto 53) e R5F3 (foto 54), invece, si sono rivelate piuttosto problematiche in quanto le dimensioni delle piante erano tali da non consentire il corretto funzionamento della macchina, soggetta a ripetuti e prolungati ingolfamenti.



Foto 53 – Prove di abbattimento di pioppo R3F3 (Montagnana - PD).



Foto 54 – Ceppaia di pioppo R5F3.

Come mostrato in figura 20, la percentuale di ingolfamenti aumentava progressivamente con le dimensioni diametriche. Con piante della classe 101-120 mm l'incidenza degli ingolfamenti sul tempo operativo era già superiore al 20%, superando il 30% nella classe diametrica successiva. Il lavoro risultava, infine, insostenibile con tronchi di diametro superiore a 160 mm (con una percentuale di ingolfamento superiore al 90%).

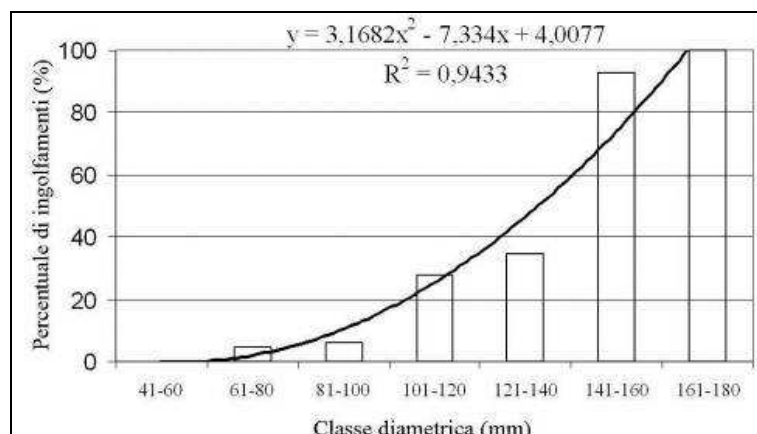


Figura 20 – Percentuale di ingolfamenti dell'abbattitrice andanatrice in funzione dei diametri delle piante.

La correlazione esistente tra gli ingolfamenti registrati e i diametri delle piante è stata valutata con il test non parametrico di Spearman (correlazioni per Ranghi) (tabella 19). Il test evidenzia la presenza di correlazioni statisticamente significative tra le due variabili.

Tabella 19 - Correlazioni per ranghi di Spearman (DM elimin. pairwise. Correlazioni significative a liv. $p < 0,05000$).

Variabile	Diametri	Ingolfamenti
Diametri	1,000	0,014
Ingolfamenti	0,014	1,000

Gli impianti fuori turno possono presentare livelli di sviluppo nettamente superiori a quelli riscontrabili in piantagioni a turno regolare, condizionando l'operatività della macchina. I diametri medi rilevati nelle piantagioni R3F3 e R5F3 (polloni principali)

risultano maggiori di quelli relativi, ad esempio, all’impianto R2F2 abbattuto ad Argenta (figura 21).

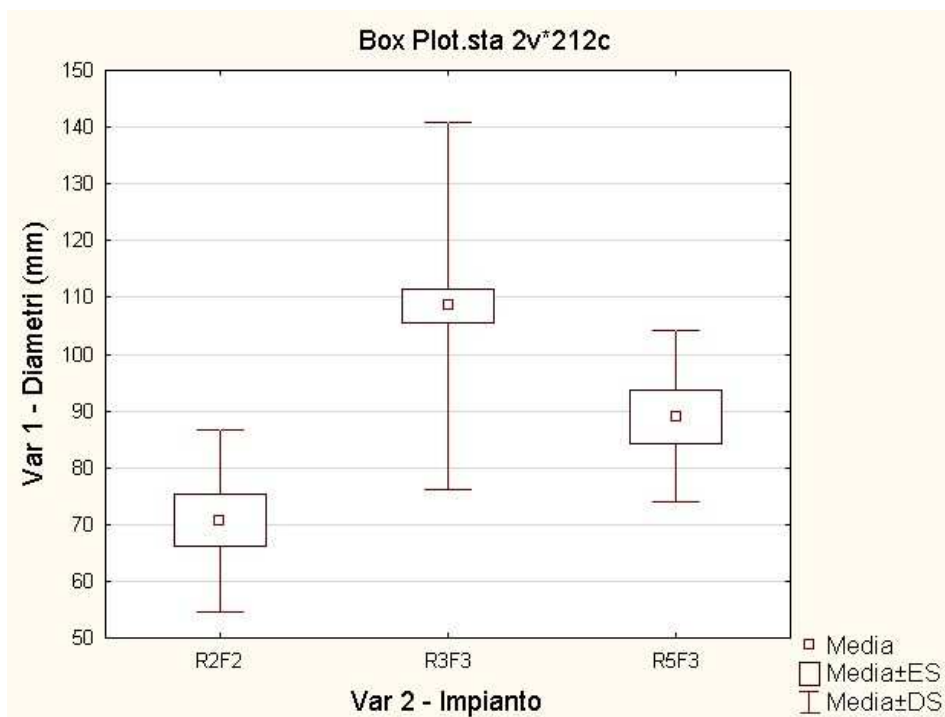


Figura 21 - Distribuzione dei diametri all’interno dei popolamenti R5F3, R3F3 e R2F2.

I dati relativi ai diametri delle tre piantagioni sopra citate sono stati analizzati statisticamente. Lo Shapiro Wilk W test (tabella 20) non ha rigettato l’ipotesi nulla di normalità ($p > 0,05$) mentre il test di Levene per valutare l’omogeneità della varianza (omoschedasticità) è risultato significativo ($p = 0,007449$), evidenziando eteroschedasticità.

Tabella 20 - Shapiro – Wilk W test

	R2F2	R3F3	R5F3
N	7	120	10
Shapiro-Wilk W	0,9846	0,9818	0,9148
p(normal)	0,9787	0,1045	0,3155

L'anova a una via (F test di Welch per dati eteroschedastici) ha rilevato l'esistenza di differenze statisticamente significative tra gli impianti R3F3, R5F3 e R2F2 (tabella 21).

Tabella 21 - Anova a una via (F test di Welch).

Effetto	SS	Gradi di libertà	MS	F	P
Impianto	180E2	2	9017,	20,52	0,000*

In tabella 22 e in figura 22 viene riportata la statistica descrittiva relativa alle tre tipologie di impianto.

Tabella 22 - Statistica descrittiva

	Livello	N	Media	Dev. St	Er. st.	Lim. Conf (-95%)	Lim. conf (+95%)
Totale		142	103,9355	32,269	2,707	98,582	109,289
"Var1"	R2F2	12	70,666	15,984	4,614	60,510	80,822
"Var1"	R3F3	120	108,510	32,270	2,945	102,676	114,343
"Var1"	R5F3	10	88,964	15,097	4,774	78,163	99,764

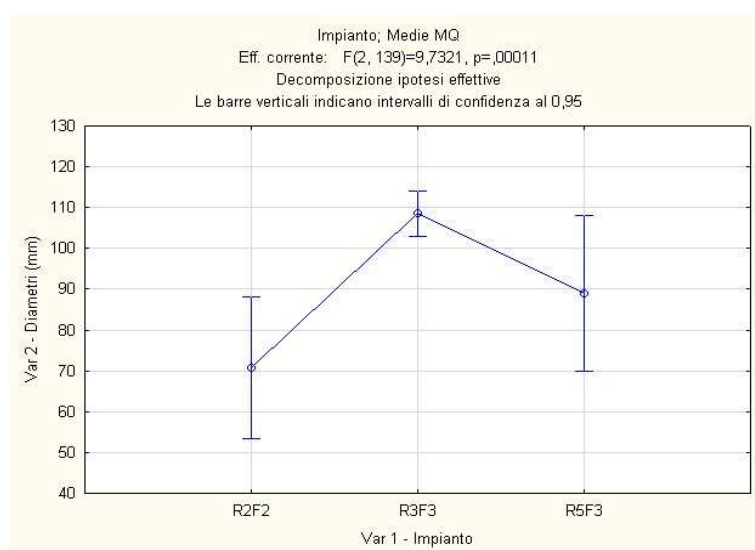


Figura 22 – Statistica descrittiva.

Il post hoc test (test HSD per numeri diseguali) (tabella 23) indica che non vi è correlazione tra i gruppi, così come la correlazione per Ranghi di Spearman (tabella 24).

Tabella 23 – Post hoc test per numeri diseguali.

HSD N Diseg.; variabile Var2 (Spreadsheet1) Errore: MS Tra grp= 926,54, gl = 139,000			
	Var1	Var2	1
1	R2F2	70,666	****
2	R3F3	108,510	****
3	R5F3	88,964	****

Tabella 24 - Correlazioni per Ranghi di Spearman, DM elimin. pairwise. Correlazioni marcate significative a liv. $p < 0,05000$.

Variabile	Impianto	Diametri
Impianto	1,000	0,135
Diametri	0,135	1,000

Rapportando le performance della macchina alla produttività delle piantagioni, sia a turno regolare sia fuori turno, è possibile notare come la capacità di lavoro operativa scenda al di sotto dell'ettaro/ora su impianti con produttività superiori alle $14,60 \text{ t s.s. ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ (figura 23). Quantitativi di biomassa maggiori implicano la presenza di un numero eccessivo di piante di grandi dimensioni e il conseguente non corretto funzionamento della macchina.

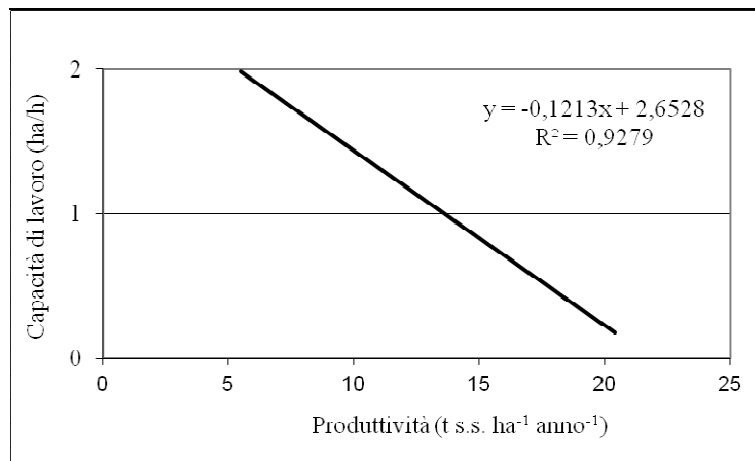


Figura 23 – Capacità di lavoro operativa in funzione della produttività degli impianti.

Al fine di valutare statisticamente la correlazione esistente tra l'operatività della macchina e la produttività delle piantagioni è stato effettuato il test non parametrico di Spearman (correlazioni per Ranghi) (tabella 25). Il test evidenzia la presenza di correlazioni significative tra le due variabili.

Tabella 25 - Correlazioni per ranghi di Spearman (DM elimin. pairwise. Correlazioni significative a liv. p <,05000).

Variabile	Produttività impianti	Operatività
Produttività impianti	1,000	0,044
Operatività	0,044	1,000

Compattamento del suolo prodotto durante la raccolta delle Short Rotation Forestry

In questo studio è stato valutato il compattamento prodotto dal transito delle macchine impiegate nella raccolta in una fase (falciatrinciacaricatrici e trattori con rimorchi carichi di cippato) e il compattamento prodotto dal passaggio dell'abbattitrice andanatrice sviluppata per la raccolta in due fasi. Il fine era quello di documentare il diverso grado di compattamento prodotto dal cantiere in due fasi in alternativa a quello tradizionale.

Caratteristiche delle macchine che partecipavano ai cantieri di raccolta

La Claas Jaguar 890 è una macchina semovente della potenza di 372 kW e massa complessiva di 11560 kg. Nello studio è stata abbinata ad una testata da biomassa GBE-1 del peso di 1950 kg.

La falciatrinciacaricatrice Spapperi mod. RT, del peso di 1800 kg, era abbinata ad una trattrice 4RM DEUTZ-FAHR (modello 720 Agrotron) del peso di 7520 kg (7146 cc, 202 kW di potenza).

L'abbattitrice andanatrice, del peso di 1300 kg, era collegata all'attacco a tre punti posteriore di una trattrice 4RM DEUTZ-FAHR (modello Agropius 410) del peso di 3670 kg (4.000 cc, 70 kW di potenza). L'operatrice, analogamente alle due testate di raccolta, scarica il proprio peso su due ruote folli che consentono anche di regolare l'altezza di lavoro.

Per la movimentazione del prodotto cippato è stata utilizzata una trattrice JOHN DEERE (6610 cc, 84 kW di potenza) del peso di 3790 kg, trainante un carro BOSSINI da 30 m³, quest'ultimo del peso complessivo, considerando il carico di cippato, di 14900 kg (massa a vuoto 6500 kg).

In tabella 26 vengono riportati i pesi delle macchine e le misure degli pneumatici montati.

Tabella 26 – Caratteristiche delle macchine coinvolte nei diversi cantieri di raccolta.

TESI		Macchina	Massa (kg)	Pneumatici ant.	Pneumatici post.
1	T1 _{op}	Claas Jaguar 890	11560	650/75/32	540/65/24
		Testata GBE-1	1950	-	
	T1 _T	JOHN DEERE 6610	3790	480/65R28	600/65R38
		Rimorchio Bossini carico di cippato	14900	500/60R22,5 (3 assali)	
2	T2 _{op}	Falciatrinciacaricatrice RT	1800	400/60/15,5	
	T2 _{mot}	DEUTZ-FAHR Agrotron 720	7520	600/65R38	710/70R42
3	T2 _{op}	Abbattitrice-andanatrice	1300	205/65/15	
	T2 _{mot}	DEUTZ-FAHR 410 Agropius	3670	380/70R20	540/65R30

Caratteristiche del terreno

Il terreno sul quale sono state condotte le prove era di natura franco-sabbiosa-argillosa (classificazione USDA), privo di scheletro e costituito per il 55% da sabbia, per il 15% da limo e per il 30% da argilla. Il terreno, a giacitura piana, si presentava con un contenuto medio di umidità del 15,3% (dev. st. $\pm 3,61$).

Resistenza alla penetrazione

Il transito delle macchine ha prodotto un incremento della resistenza alla penetrazione (espressa in MPa) rispetto al campione indisturbato (figura 24).

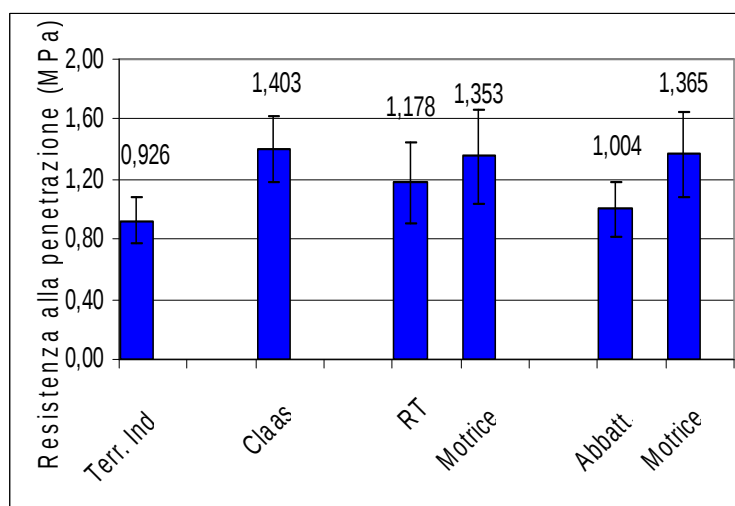


Figura 24- Valori medi di resistenza alla penetrazione per le diverse tesi considerate.

Il passaggio della falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar (tesi T1_{op}) ha prodotto un incremento della resistenza alla penetrazione del 38,45% nello strato compreso tra 0 e 100 mm, del 74,42% nello strato compreso tra 100 e 200 mm e del 47,01% nello strato compreso tra 200 e 400 mm (figura 25, foto 55).

La tesi T1_T mette in evidenza l'effetto prodotto dal passaggio della trattrice con rimorchio carico di cippato sulla traccia lasciata precedentemente dalla raccoglitrice Claas Jaguar (foto 56). In questo caso è stato registrato un incremento della resistenza alla penetrazione

ben superiore a quanto registrato per la sola raccoglitrice: +61,80% nello strato 0-100 mm, +112,16% nello strato 100-200 mm, +59,85% nello strato 200-400 mm.

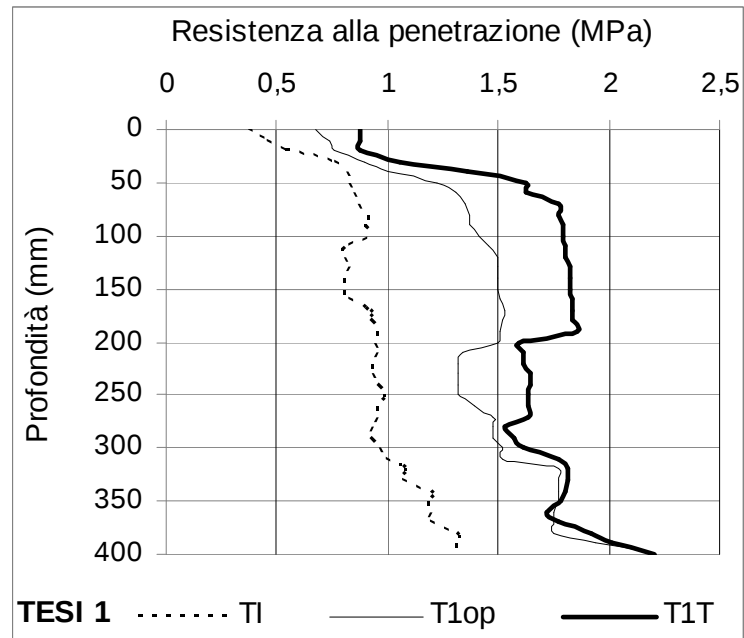


Figura 25 - Valori medi della resistenza alla penetrazione registrati nel cantiere Claas.



Foto 55 - Orma della semovente Claas.



Foto 56 – Passaggio della trattrice con rimorchio carico di cippato sulla traccia della semovente Claas.

Il transito della falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi mod. RT (tesi T2_{op}) e della trattrice abbinata (tesi T2_{mot}) ha prodotto, rispettivamente, incrementi della resistenza alla penetrazione del 19,43% e del 22,64% nello strato compreso tra 0 e 100 mm, del 44,78% e del 73,82% nello strato compreso tra 100 e 200 mm e del 22,88%, e del 45,95% nello strato compreso tra 200 e 400 mm (figura 26).

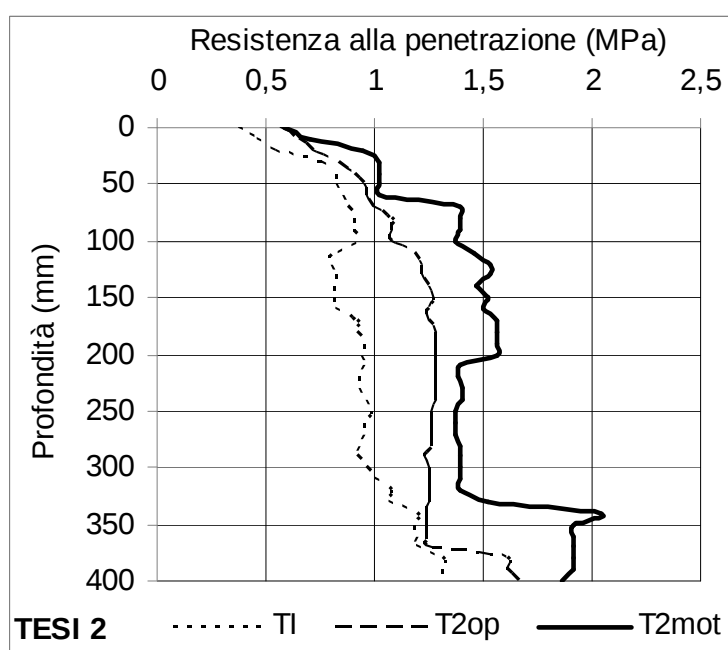


Figura 26 - Valori medi della resistenza alla penetrazione registrati nel cantiere Spapperi.

Il transito dell'abbattitrice andanatrice (tesi T3_{op}) e della trattrice abbinata (tesi T3_{mot}) produce, rispettivamente, incrementi della resistenza alla penetrazione del 6,60% e del 52,52% nello strato compreso tra 0 e 100 mm, del 28,79% e del 71,25% nello strato compreso tra 100 e 200 mm, e del 4,54% e del 33,28% nello strato compreso tra 200 e 400 mm (figura 27, foto 57).

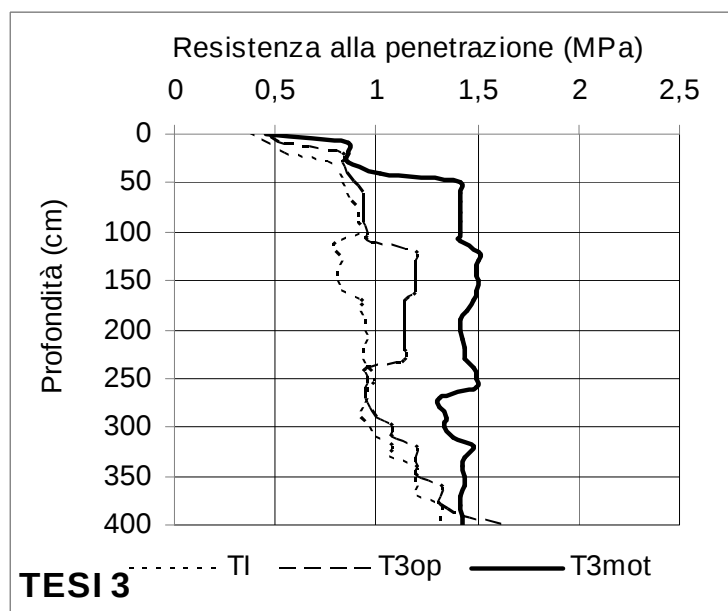


Figura 27- Valori medi della resistenza alla penetrazione registrati nel cantiere di abbattimento.



Foto 57 – Tracce lasciate dall'abbattitrice andanatrice.

Il quadro riepilogativo degli incrementi medi di resistenza alla penetrazione, lungo tutto il profilo esaminato (0-400 mm), è evidenziato in figura 28. Come è possibile notare la falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar (T1_{op}) ha prodotto un incremento del 52,1%, valore che sale al 74,2% dopo il transito della trattrice con rimorchio carico di cippato sulla medesima traccia (tesi T1_T). Tra le operatrici l'abbattitrice andanatrice ha prodotto l'incremento minore, +8,4% (tesi T3_{op}), seguita dalla testata cippatrice RT, +28,8% (tesi T2_{op}). Tra le trattrici abbinate alle operatrici, quella collegata all'abbattitrice andanatrice (tesi T3_{mot}) ha prodotto un incremento medio di resistenza alla penetrazione maggiore rispetto alla trattrice abbinata alla falciatrinciacaricatrice RT (tesi T2_{mot}), rispettivamente +48,9% e +46,3%.

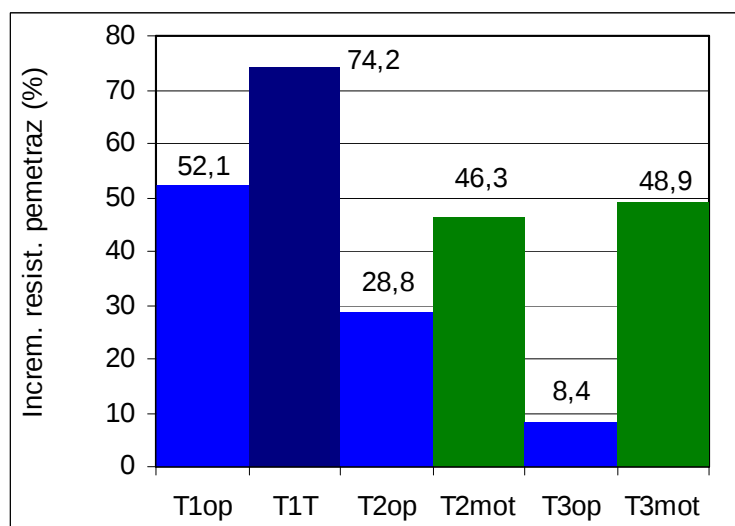


Figura 28 - Incremento della resistenza alla penetrazione prodotto dal passaggio delle macchine rispetto al terreno indisturbato.

Massa volumica apparente

Uno strato coltivato normalmente possiede una densità apparente che oscilla tra 1,1 e 1,4 g/cm³, mentre può assumere valori sensibilmente maggiori nei suoli compattati, con valori anche superiori a 2 g/cm³ (Regione Campania 2001).

La massa volumica apparente del terreno indisturbato è risultata pari a 1,546 g/cm³ e dopo il transito delle operatrici sono stati raggiunti valori di 1,705 g/cm³ per la semovente

Claas Jaguar (tesi T1_{op}), 1,618 g/cm³ e 1,627 g/cm³ rispettivamente per l'abbattitrice andanatrice (tesi T3_{op}) e per la trattrice ad essa abbinata (tesi T3_{mot}) (figura 29).

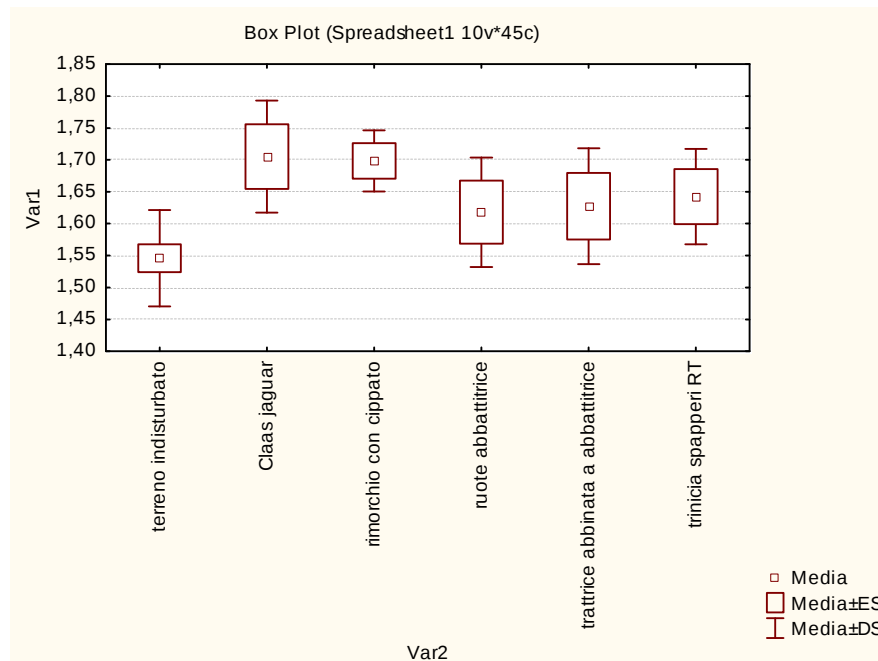


Figura 29 - Massa volumica apparente del terreno prima (T1) e dopo il passaggio delle macchine.

I dati rilevati confermano quanto già emerso dallo studio sulla resistenza alla penetrazione. L'abbattitrice andanatrice ha prodotto l'incremento di massa volumica apparente più basso, +4,7% (tesi T3_{op}) e +8% (tesi T3_{mot}), mentre la Claas Jaguar l'incremento maggiore, +10,3% (tesi T1_{op}).

La normalità e l'omoschedasticità dei dati sono state testate utilizzando rispettivamente lo Shapiro Wilk W test (tabella 27) e il test di Levene.

Tabella 27 – Shapiro Wilk W test.

	1	2	3	4	5	6
N	12	3	3	3	3	3
Shapiro - Wilk W	0,8957	0,8287	0,8857	0,7845	0,9983	0,9594
P (normal)	0,1396	0,185	0,3413	0,077	0,92	0,6127

Lo Shapiro Wilk W test non ha rigettato l'ipotesi nulla di normalità ($p > 0,05$) e il test di Levene per testare l'omogeneità della varianza (omoschedasticità) non è risultato significativo ($p = 0,7563$), evidenziando omoschedasticità.

I dati rilevati, quindi, sono stati analizzati utilizzando l'anova a una via. L'analisi della varianza ha rilevato differenze statisticamente significative tra la massa volumica apparente del terreno prima e dopo il passaggio delle macchine (tabella 28).

Tabella 28 - Anova a una via.

Effetto	SS	Gradi di libertà	MS	F	p
Macchina	,104	5	,021	3,500	0,019*

In tabella 29 e in figura 30 viene riportata la statistica descrittiva dei dati sopra discussi.

Tabella 29 – Statistica descrittiva.

	Livello	N	Media	Dev. st.	Er. St.	Lim. Conf (-95%)	Lim. conf (+95%)
Totale		27	1,608259	0,093823	0,018056	1,571144	1,645374
"Var2"	terreno indisturbato	12	1,545833	0,075420	0,021772	1,497914	1,593753
"Var2"	Claas Jaguar	3	1,705000	0,087881	0,050738	1,486692	1,923308
"Var2"	rimorchio con cippato	3	1,698333	0,047816	0,027606	1,579553	1,817114
"Var2"	ruote abbattitrici	3	1,618000	0,085808	0,049541	1,404841	1,831159
"Var2"	trattorice abbinata a abbattitrici	3	1,627333	0,090578	0,052295	1,402326	1,852341
"Var2"	trincia Spapperi RT	3	1,642333	0,074527	0,043028	1,457197	1,827470

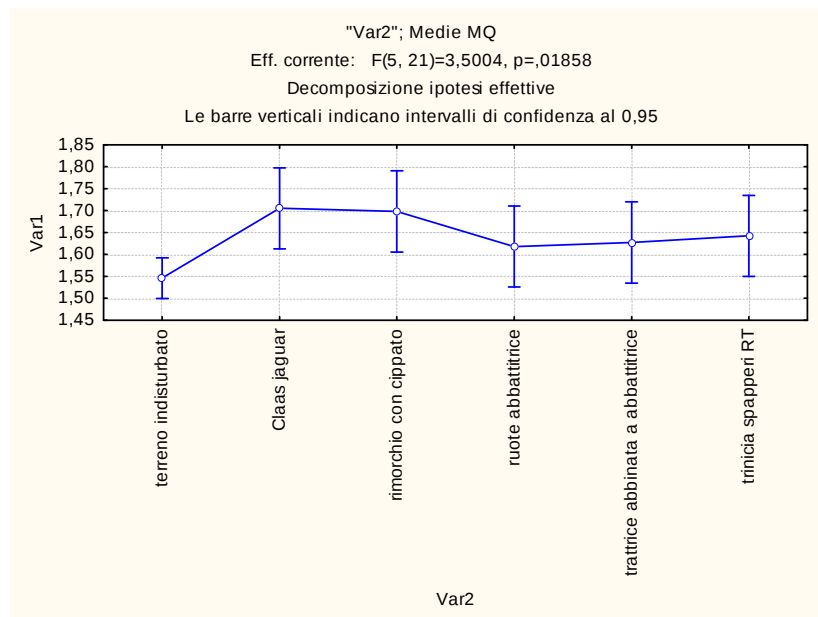


Figura 30 – Statistica descrittiva.

Il post hoc test (test HSD per numeri diseguali) (tabella 30) e la correlazione per Ranghi di Spearman (tabella 31) indicano che non vi è correlazione tra i gruppi.

Tabella 30 – Post hoc test per numeri diseguali.

HSD N Diseg.; variabile Var1 (Spreadsheet1) Gruppi Omogenei, alfa = ,05000			
Errore: MS Tra grp= ,00594, gl = 21,000			
	Var2	Var1	1
1	terreno indisturbato	1,545833	****
4	ruote abbattitrici	1,618000	****
5	trattrice abbinata a abbattitrici	1,627333	****
6	trincia Spapperi RT	1,642333	****
3	rimorchio con cippato	1,698333	****
2	Claas Jaguar	1,705000	****

Tabella 31 - Correlazioni per Ranghi di Spearman, DM elimin. pairwise. Correlazioni marcate significative a liv. $p < 0,05000$.

Variabile	Macchina	Bulk density
Macchina	1,000	0,446
Bulk density	0,446	1,000

Processo di disidratazione delle piante stoccate nell'interfila

La raccolta in due fasi del pioppo biennale consente di posticipare la cippatura delle andane nell'interfila a fine maggio - primi di giugno, utilizzando per la raccolta falciatrinciacaricatrici equipaggiate con testate pick up. Operando in tal modo è possibile ottenere un cippato con basso contenuto di umidità, più idoneo ad essere stoccato per lunghi periodi. Nel presente lavoro si è proceduto a monitorare il processo di disidratazione delle piante e ad elaborare una curva di disidratazione in grado di stimare il numero di giorni di stoccaggio necessari affinché la biomassa raggiunga determinati livelli di umidità. Le caratteristiche delle tre piantagioni utilizzate per la sperimentazione sono riportate in tabella 32.

Tabella 32 - Descrizione dei siti.

Regione	Umbria	Emilia Romagna	Emilia Romagna
Sito	1	2	3
Longitudine (°E)	12°14'35.13"	11°38'56.45"	11°51'29.13"
Latitudine (°N)	43°24'26.75"	44°38'45.60"	44°36'35.38"
Età	R4F4	R2F2	R2F2
Diametro (mm)	77,40 ($\pm 14,05$)	69,51 ($\pm 12,15$)	70,66 ($\pm 9,22$)
Altezza (m)	7,86 ($\pm 0,91$)	7,20 ($\pm 0,78$)	7,35 ($\pm 0,81$)
Superficie (ha)	3,60	4,70	3,00
Quota (m s.l.m.)	264	-3	-2
Densità (p/ha)	7140	5700	5700
Interfila (m)	2,80	3,50	3,50
Distanza sulla fila (m)	0,50	0,50	0,50
Clone	AF2	AF2	AF2
Data di abbattimento	20/02/09	10/03/09	10/03/09
Data di cippatura	17/06/09	10/06/09	17/06/09

Monitoraggio del processo di disidratazione delle piante stoccate in andana

L'impianto di pioppo localizzato nel sito 1 è stato abbattuto il 20/02/2009 e raccolto il 17/06/2009.

Come si evince dalla figura 31, al momento dell'abbattimento le piante presentavano un contenuto medio di umidità del 59,27%. A distanza di 17 giorni si è registrato un lieve incremento (61,09%), probabilmente frutto dell'interazione di temperature relativamente basse, elevata umidità atmosferica e piogge concentrate nei giorni che hanno preceduto il prelievo. Dal 10 marzo al 30 aprile si è verificato un costante decremento del tenore idrico, in corrispondenza del progressivo innalzamento delle temperature, nonostante le piogge primaverili (tabella 33). A metà maggio è stata registrata la maggiore perdita di umidità, passando, nell'arco di una sola settimana, dal 45,83% al 35,21%. Tale evento è da mettere in relazione col progressivo aumento delle temperature e con l'assenza quasi totale di precipitazioni. A fine maggio è stato registrato, in concomitanza con una precipitazione di 26,4 mm (avvenuta due giorni prima del campionamento), un lieve aumento del contenuto di umidità della biomassa, passata dal 35,21% al 36,94%. Tra la fine di maggio e i primi di giugno la percentuale di umidità è risultata variabile tra il 35% e il 30%. Superata la metà di giugno il tenore idrico si è ridotto ulteriormente (28%), ma è preferibile non operare oltre i primi di giugno per non danneggiare i polloni in fase di accrescimento.

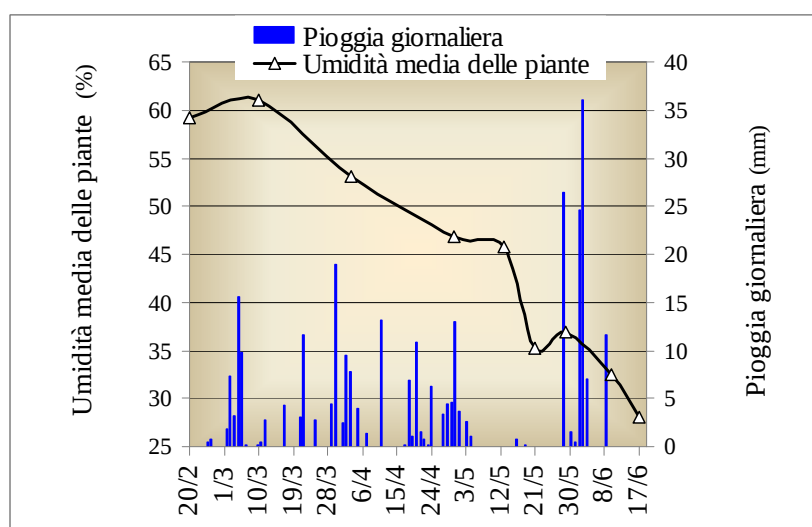


Figura 31 - Disidratazione delle andane e andamento pluviometrico del sito 1.

Tabella 33 - Dati meteo e valori medi di umidità delle piante registrati durante il periodo di stoccaggio nel sito 1.

			Dati meteo di riferimento		
N.° Prelievo	Data prelievo	Umidità media delle piante (%)	Temperatura media giornaliera nel periodo fra due prelievi (°C)	Umidità media giornaliera nel periodo fra due prelievi (%)	Precipitazioni cumulate tra due prelievi (mm)
1	20/02/09	59,27			
2	10/03/09	61,09	6,4	72	39,4
3	03/04/09	53,12	8,7	66	67,4
4	30/04/09	46,77	12,7	69	71,6
5	14/05/09	45,83	16	62	3,6
6	21/05/09	35,21	19,3	64	1,0
7	29/05/09	36,94	22	60	26,4
8	10/06/09	30,52	17	71	80
9	17/06/09	28,11	22	64	0

Gli impianti localizzati nelle province di Bologna (sito 2) e Ferrara (sito 3) sono stati abbattuti il 10 marzo 2009 e raccolti rispettivamente il 10 e il 17 giugno. Nel sito 2 le piante abbattute evidenziavano un contenuto medio di umidità del 59,63% (figura 32). Dopo cinquanta giorni di stoccaggio l'umidità è scesa di pochi punti percentuali (51,93%), probabilmente a causa degli eventi piovosi piuttosto consistenti registrati nel periodo di riferimento (circa 114 mm). Nei trenta giorni successivi, invece, vi è stato un repentino calo dell'umidità, dal 51,93% al 37,94%. Tale periodo è risultato contraddistinto da temperature elevate e da piogge scarse nella prima settimana e del tutto assenti nel periodo successivo (tabella 34). Al momento della raccolta il tenore idrico medio delle piante andate era del 35,67%.

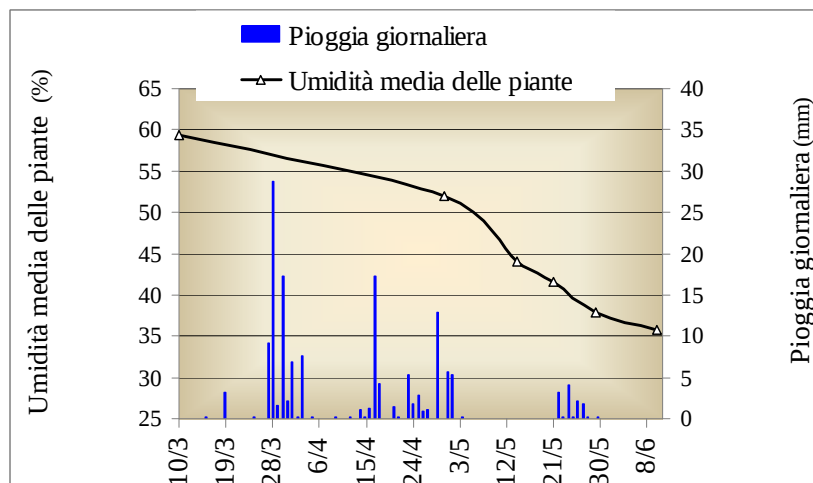


Figura 32 - Disidratazione delle andane e andamento pluviometrico del sito 2.

La curva di disidratazione relativa al sito 3 (figura 33) è risultata molto simile a quella del sito 2. Al 10 di giugno la differenza di umidità delle piante era di soli 3,27 punti percentuali. Nel sito 3 la raccolta è avvenuta con una settimana di ritardo rispetto al sito 2 e ciò ha comportato un'ulteriore perdita di umidità della biomassa, scesa al 29,20%.

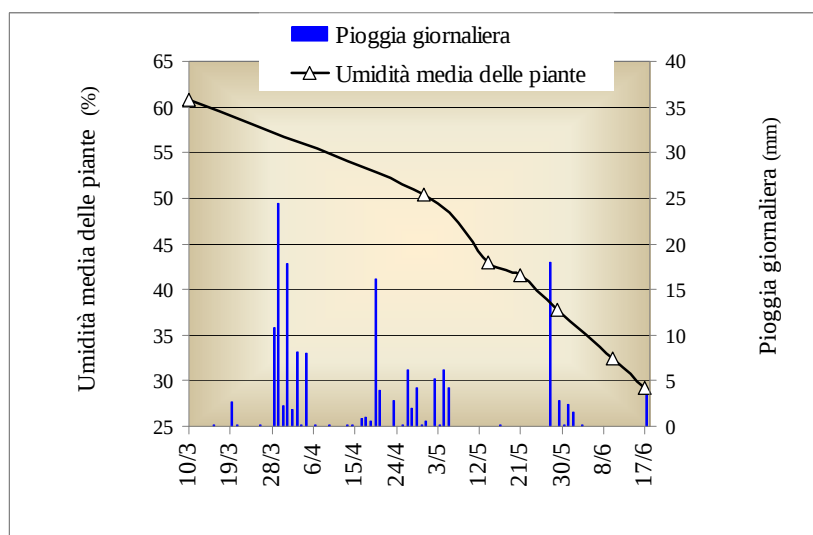


Figura 33 - Disidratazione delle andane e andamento pluviometrico del sito 3.

In tabella 34 vengono riassunti i principali dati meteo e i valori medi di umidità delle piante registrati durante il periodo di stoccaggio (siti 2 e 3).

Tabella 34 - Dati meteo e valori medi di umidità delle piante registrati durante il periodo di stoccaggio nei siti 2 e 3.

			Dati meteo di riferimento		
N.° Prelievo	Data prelievo	Umidità media delle piante (%)	Temperatura media giornaliera nel periodo fra due prelievi (°C)	Umidità media giornaliera nel periodo fra due prelievi (%)	Precipitazioni cumulate tra due prelievi (mm)
Sito 2					
1	10/03/09	59,63			
2	30/04/09	51,93	11,42	75	113,80
3	14/05/09	44,05	17,27	68	23,80
4	21/05/09	41,52	20,54	68	0
5	29/05/09	37,94	23,05	64	3,40
6	10/06/09	35,67	19,55	67	4,60
Sito 3					
1	10/03/09	60,80			
2	30/04/09	50,35	11,43	76	115,6
3	14/05/09	43,03	16,46	69	16
4	21/05/09	41,55	21	69	0,2
5	29/05/09	37,72	22,78	68	18
6	10/06/09	32,40	19,11	71	4,4
7	17/06/09	29,20	23,25	64	0

Curva di disidratazione

L'analisi statistica ha evidenziato la migliore rispondenza del modello parabolico, nel quale il termine di primo grado non compare in quanto statisticamente non significativo:

$$y_i = \alpha^2 + \gamma^2 x_i^2 + u_i \quad i = 1, \dots, 132 \quad (4)$$

Di seguito sono riportate le statistiche del modello selezionato (tabella 35) e il grafico della curva stimata (figura 34).

Tabella 35 - Modello 1: OLS, osservazioni 1-132. Variabile dipendente: numero giorni. Errori standard robusti rispetto all'eteroschedasticità.

	<i>Coefficiente</i>	<i>Errore St.</i>	<i>rapporto t</i>	<i>p-value</i>	
Const	133,833	2,89559	46,2196	<0,00001	***
umidità^2	-0,0335391	0,00156924	-21,3728	<0,00001	***
Media var. dipendente	65,68182		SQM var. dipendente	34,31207	
Somma quadr. residui	17730,43		E.S. della regressione	11,67852	
R-quadro	0,885038		R-quadro corretto	0,884154	
F(1, 130)	456,7970		P-value(F)	2,25e-44	
Log-verosimiglianza	-510,7154		Criterio di Akaike	1025,431	
Criterio di Schwarz	1031,196		Hannan-Quinn	1027,774	

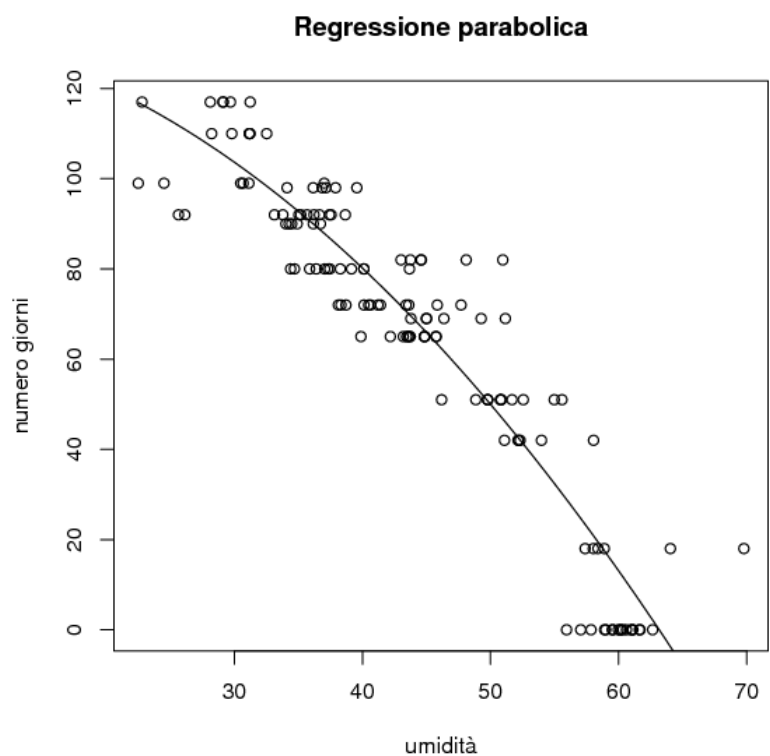


Figura 34 – Curva di disidratazione del pioppo andanato.

L'equazione da utilizzare per valutare i giorni di stoccaggio necessari affinché la biomassa raggiunga determinati livelli di umidità è la seguente:

$$n = 133.833 - 0.0335391 * w^2$$

dove n è il numero di giorni di stoccaggio e w il livello di umidità desiderato. È possibile quindi raggiungere valori di umidità del 40%, 35% e 30% rispettivamente in 80, 93 e 103 giorni. Un risultato importante, dal punto di vista statistico, si ha considerando le medie giornaliere delle percentuali di umidità rilevate (15 unità statistiche). Anche in questo caso l'analisi statistica indica la migliore rispondenza del modello parabolico (senza termine di primo grado). Tale risultato evidenzia una buona robustezza statistica del modello prescelto. Di seguito sono riportate le statistiche del II modello e il grafico delle stime ottenute (tabella 36, figura 35).

Tabella 36 - Modello 2: OLS, osservazioni 1-15. Variabile dipendente: numero giorni. Errori standard robusti rispetto all'eteroschedasticità.

	<i>Coefficiente</i>	<i>Errore St.</i>	<i>rapporto t</i>	<i>p-value</i>	
Const	136,738	5,26948	25,9491	<0,00001	***
umidità^2	-0,0338862	0,00286978	-11,8079	<0,00001	***
Media var. dipendente	72,33333		SQM var. dipendente	33,01443	
Somma quadr. Residui	1015,973		E.S. della regressione	8,840349	
R-quadro	0,933420		R-quadro corretto	0,928298	
F(1, 13)	139,4270		P-value(F)	2,54e-08	
Log-verosimiglianza	-52,90072		Criterio di Akaike	109,8014	
Criterio di Schwarz	111,2175		Hannan-Quinn	109,7863	

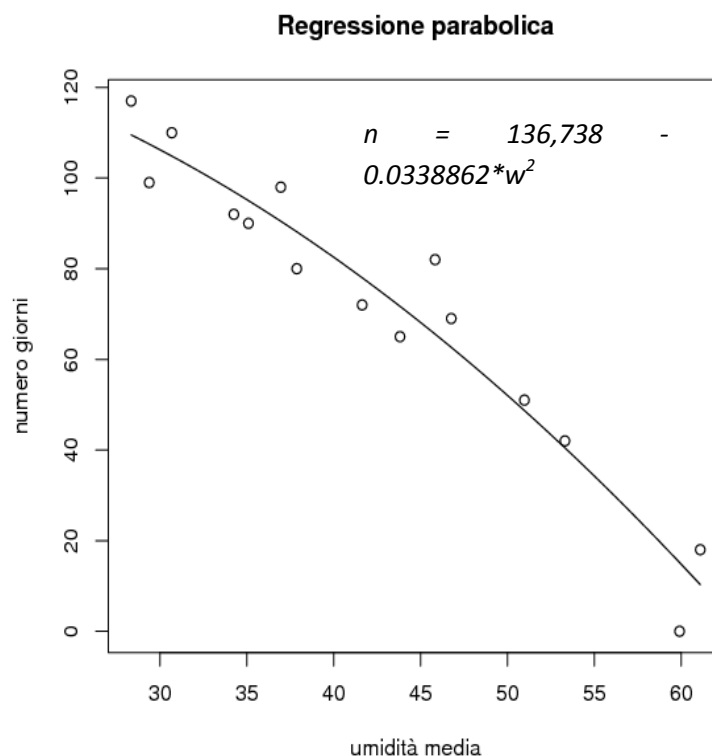


Figura 35 – Curva di disidratazione del pioppo andanato.

Pezzatura del cippato prodotto in funzione del contenuto di umidità delle piante

Scopo del lavoro era quello di individuare le differenze dimensionali del cippato prodotto trinciando piante fresche e piante disidratate in andana. La sperimentazione è stata condotta nel sito 3 descritto nel precedente contributo (tabella 32).

Le piante in piedi sono state trinciate il 10 marzo e presentavano un contenuto di umidità del 60,80%. Le piante andanate sono state trinciate, invece, il 10 giugno e presentavano un contenuto di umidità del 32,40%.

Descrizione dei dispositivi di trinciatura

La Claas Jaguar monta un cippatore a tamburo del peso di 195 kg, con diametro e lunghezza pari rispettivamente a 630 mm e 750 mm. Sul mantello del tamburo sono saldati 24 portacoltelli e nella raccolta delle SRF vengono montati 12 coltelli su 24 (al fine di evitare un eccessivo sminuzzamento del materiale). La Spapperi RT, invece, è

equipaggiata con un cippatore a disco del peso di 240 kg, con diametro e spessore pari rispettivamente a 1050 mm e 30 mm. Il disco monta due coltelli radiali che agiscono su un contro coltello.

Risultati

L'analisi granulometrica ha rilevato, mediamente, una diversa ripartizione percentuale del prodotto tra le diverse classi in funzione della tesi considerata (tabella 37). Il cippato ottenuto con la Claas Jaguar tende a spostarsi verso le classi dimensionali più ampie durante la raccolta delle piante disidratate e verso le classi dimensionali più piccole durante la raccolta delle piante fresche. Il cippato ottenuto con la Spapperi, diversamente, tende a spostarsi verso le classi dimensionali più piccole durante la raccolta delle piante disidratate e verso le classi dimensionali più grandi durante la raccolta delle piante fresche.

Tabella 37 – Ripartizione % dei campioni di cippato tra le diverse classi granulometriche per tesi considerata.

Tesi	Macchina	Piante	Classi granulometriche (mm)					
			> 63	45 - 63	16 - 45	3,15 - 16	< 3,15	Impurità
1A	Claas	In piedi	1,15 ± 0,18	2,00 ± 0,64	59,33 ± 0,95	32,72 ± 1,03	1,12 ± 0,36	3,47 ± 0,75
1B	Claas	Andanate	0,27 ± 0,18	7,00 ± 1,79	66,72 ± 4,19	24,50 ± 3,07	1,50 ± 0,67	0,02 ± 0,05
2A	Spapperi	In piedi	0,90 ± 0,250	2,20 ± 0,51	66,68 ± 3,64	23,20 ± 2,95	1,75 ± 0,20	5,27 ± 0,13
2B	Spapperi	Andanate	1,85 ± 0,12	3,50 ± 0,20	62,68 ± 1,31	30,60 ± 0,86	1,17 ± 0,31	0,50 ± 0,02

L'analisi della varianza (tabella 38) ha evidenziato l'esistenza di differenze statisticamente significative nelle classi 63 – 45, 45 – 16, 16 – 3,15 per il cippato prodotto dalla Claas Jaguar (tesi 1A e 1B), e nelle classi 45 - 16, 16 – 3,15 per il cippato prodotto dalla Spapperi RT (tesi 2A e 2 B).

Tabella 38 – Analisi della varianza previa trasformazione dei dati in radice quadrata dell’arcoseno. Lettere differenti indicano differenze statisticamente significative ($p \leq 0,01$).

	Claas Jaguar		Spapperi RT	
Classe (mm)	Tesi 1A	Tesi 1B	Tesi 2A	Tesi 2B
>63	1,15 H	0,27 H	0,90 H	1,85 GH
63-45	2,00 GH	7,00 F	2,20 GH	3,50 GH
45-16	59,33 C	66,72 A	66,68 A	62,68 B
16-3,15	32,72 D	24,50 E	23,20 E	30,60 D
<3,15	1,12 H	1,50 H	1,75 GH	1,17 H
Impurità	3,47 GH	0,02 H	5,27 FG	0,50 H

La Claas Jaguar tende a produrre un cippato qualitativamente superiore operando su pioppo andanato rispetto al prodotto fresco. Risulta infatti incrementata la percentuale di scaglie ricadenti nella classe granulometrica più rappresentata (16 – 45 mm), dal 59,33% al 66,72%, e ridotta quella ricadente nella frazione più piccola (16 – 3,15 mm), dal 32,72% al 24,50%.

Risultati diversi sono stati ottenuti, invece, con la Spapperi RT. La cippatura del prodotto andanato ha comportato una riduzione della percentuale di scaglie ricadenti nella classe 16 – 45 mm, dal 66,68% al 62,68%, ed un incremento del prodotto nella classe granulometrica 16 – 3,15 mm, dal 23,20% al 30,60%.

Per quanto concerne le impurità (foglie, pietre, suolo), entrambe le macchine hanno mostrato un comportamento simile, producendone una maggiore percentuale durante la raccolta delle piante in piedi. Ciò potrebbe essere spiegato dal fatto che, durante la raccolta in una fase, tutto ciò che si trova al di sopra delle lame di taglio entra a far parte del prodotto raccolto mentre i pick up sono conformati in modo tale da rilasciare a terra le impurità presenti nel prodotto prima della cippatura.

L’analisi dei dati rivela, tuttavia, che tale differenza è statisticamente significativa solo nel caso della Spapperi, nonostante la percentuale di impurità fatta registrare dalla Claas Jaguar su prodotto andanato sia praticamente trascurabile.

Costi di esercizio delle macchine e dei cantieri

Trapiantatrice di talee Spapperi TTP 200 – versione manuale e automatica CRA ING

I costi di esercizio sono risultati di 76,76 €/h, 127,94 €/ha e 0,019 €/talea per il cantiere manuale e di 69,80 €/h, 116,33 €/ha e 0,017 €/talea per il cantiere automatico (tabella 39), considerando consumi di combustibile pari a 5,98 kg/h e 9,96 kg/ha.

Tabella 39 – Costi di esercizio della trapiantatrice manuale e automatica.

	Acquisto	Costi di esercizio		
		€/h	€/ha	€/talea
Trattrice (60 kW)	43152	30,53	50,89	-
Trap. manuale	23000	46,23	77,05	-
Trap. automatica	29000	39,27	65,44	-
Cantiere manuale	66152	76,76	127,94	0,019
Cantiere automatico	72152	69,80	116,33	0,017

L'innovazione proposta consente di ridurre da 3 a 2 unità il numero di operatori richiesti per la realizzazione di un impianto. Nel cantiere manuale vengono impiegati un trattorista e due operatori sulla trapiantatrice. Questi ultimi provvedono all'alimentazione della macchina e al rifornimento delle talee. Nel cantiere automatico, invece, vengono impiegati un trattorista e un solo operatore preposto al rifornimento del materiale di propagazione, con ripercussioni positive sui costi di esercizio orari e ad ettaro, diminuiti del 9,07%.

Cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar

Il consumo orario di combustibile della raccogliatrice è risultato di 77,69 kg/h, mentre i consumi riferiti all'unità di superficie e a tonnellata sono risultati di 78,47 kg/ha e 1,31

kg/t. Se a tali valori si sommano i consumi relativi alle trattrici che partecipano al cantiere, i consumi totali risultano di 101,59 kg/h, 102,95 kg/ha e 1,71 kg/t (tabella 40).

Tabella 40 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata del cantiere Claas.

Consumi di esercizio	Unità	Claas Jaguar	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario	kg/h	77,69	23,90	101,59
Per unità di superficie	kg/ha	78,47	24,48	102,95
Per unità di prodotto	kg/t	1,31	0,40	1,71

I costi di esercizio della falciatrinciacaricatrice sono risultati pari a 284,78 €/h, 287,66 €/ha e 4,79 €/t, a cui vanno aggiunti i costi delle trattrici e dei rimorchi per un totale di 411,47 €/h, 417,43 €/ha e 6,93 €/t (tabella 41).

Tabella 41 – Costi di esercizio del cantiere Claas.

Costi di esercizio	Unità	Claas Jaguar	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario	€/h	284,78	126,69	411,47
Per unità di superficie	€/ha	287,66	129,77	417,43
Per unità di prodotto	€/t	4,79	2,14	6,93

Cantiere di raccolta del pioppo biennale con falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT

I consumi della trattrice abbinata alla testata di raccolta sono risultati pari a 29,88 kg/h, 54,33 kg/ha e 1,04 kg/t. Considerando anche le trattrici con rimorchio i consumi totali risultano di 45,82 kg/h, 83,30 kg/ha e 1,59 kg/t (tabella 42).

Tabella 42 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata del cantiere Spapperi RT.

Consumi di esercizio	Unità	Trattrice con testata	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario	kg/h	29,88	15,94	45,82
Per unità di superficie	kg/ha	54,33	28,97	83,30
Per unità di prodotto	kg/t	1,04	0,55	1,59

I costi di esercizio della trattrice e dell'operatrice RT sono risultati di 127,71 €/h, 232,20 €/ha e 4,43 €/t, a cui vanno aggiunti i costi delle trattrici con rimorchi per un totale di 212,17 €/h, 385,77 €/ha e 7,36 €/t (tabella 43).

Tabella 43 – Costi di esercizio del cantiere Spapperi RT.

Costi di esercizio	Unità	Trattrice con testata	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario	€/h	127,71	84,46	212,17
Per unità di superficie	€/ha	232,20	153,57	385,77
Per unità di prodotto	€/t	4,43	2,93	7,36

Cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale - abbattitrici andanatrici

Il consumo orario delle trattrici abbinate alle operatrici è risultato di 15,94 kg, con valori riferiti all'unità di superficie e all'unità di prodotto variabili in funzione del cantiere considerato: 28,46 kg/ha e 0,51 kg/t per l'abbattitrice Mantovani (cantiere 1); 11,30 kg/ha e 0,21 kg/t per l'abbattitrice CRA ING (cantiere 2) (tabella 44).

Tabella 44 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata dei due cantieri a confronto.

Consumi di esercizio		Cantiere 1	Cantiere 2
Orario	kg/h	15,94	
Per unità di superficie	kg/ha	28,46	11,30
Per tonnellata	kg/t	0,51	0,21

I costi di esercizio del cantiere 1 sono risultati pari a 60,32 €/h, 107,70 €/ha e 1,94 €/t. Quelli riferiti al cantiere 2 sono risultati, invece, di 67,81 €/h, 48,09 €/ha e 0,89 €/t (tabella 45).

Tabella 45 – Costi di esercizio delle abbattitrici andanatrici per pioppo biennale.

		Costi di esercizio		
	Acquisto	€/h	€/ha	€/t
Trattrice (80 kW)	56717	44,74	-	-
Abbattit. Mantovani	27000	15,58	27,81	-
Abbattit. CRA ING	40000	23,07	16,37	-
Cantiere 1	83717	60,32	107,70	1,94
Cantiere 2.	96717	67,81	48,09	0,89

Il prototipo sviluppato dal CRA ING garantisce prestazioni operative nettamente superiori rispetto all'abbattitrice commerciale e ciò si riflette positivamente sia sui costi ad ettaro e a tonnellata, diminuiti del 55,80% e del 54,26%, sia sui consumi di combustibile, ridotti di oltre il 50%.

Cantiere di raccolta in due fasi del pioppo biennale andanato - falciatrinciacaricatrice semiportata Spapperi RT con dispositivo pick up

I consumi della trattrice abbinata alla testata di raccolta sono risultati pari a 29,88 kg/h, 62,25 kg/ha e 1,55 kg/t. Considerando anche le trattrici con rimorchio i consumi totali risultano di 45,82 kg/h, 95,45 kg/ha e 2,37 kg/t (tabella 46).

Tabella 46 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata del cantiere Spapperi RT con pick up.

Consumi di esercizio		Trattrice con testata	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario	kg/h	29,88	15,94	45,82
Per unità di superficie	kg/ha	62,25	33,20	95,45
Per unità di prodotto	kg/t	1,55	0,82	2,37

I costi di esercizio della raccoglitrice e relativa trattrice sono risultati di 127,71 €/h, 266,07 €/ha e 6,61 €/t, a cui vanno aggiunti i costi delle trattrici con rimorchi per un totale di 212,17 €/h, 442,03 €/ha e 10,98 €/t (tabella 47).

Tabella 47 – Costi di esercizio del cantiere Spapperi RT con pick up.

Costi di esercizio		Trattrice con testata	Trattrici con rimorchio	Totale
Orario		127,71	84,46	212,17
Per unità di superficie	€/ha	266,07	175,96	442,03
Per unità di prodotto	€/t	6,61	4,37	10,98

Trapiantatrici di astoni manuale (Alasia) e semiautomatica (CRA ING)

I consumi di combustibile per entrambi i cantieri sono di 19,93 kg/h e 59,76 kg/ha. I costi di esercizio del cantiere manuale sono risultati di 84,61 €/h, 282,03 €/ha e 0,166 €/astone. Quelli riferiti al cantiere semiautomatico, invece, sono risultati di 77,65 €/h, 258,83 €/ha e 0,153 €/astone (tabella 48).

Tabella 48 – Costi di esercizio delle trapiantatrici in versione manuale e semiautomatica.

		Costi di esercizio		
	Acquisto	€/h	€/ha	€/astone
Trattrice (90 kW)	72791	54,07	180,24	-
Trap. manuale	6000	30,54	101,79	-
Trap. semiautom.	12000	23,58	78,59	-
Cantiere manuale	78791	84,61	282,03	0,166
Cantiere semiautom.	84791	77,65	258,83	0,153

L'innovazione proposta consente di ridurre il personale richiesto per la realizzazione di un impianto da 3 a 2 unità. Nel cantiere manuale vengono impiegati un trattorista e due operatori sulla trapiantatrice. Questi ultimi provvedono all'inserimento degli astoni nel solco e al rifornimento della operatrice. Nel cantiere semiautomatico, invece, vengono impiegati un trattorista e un operatore preposto all'alimentazione del dispositivo di trasporto e al rifornimento del materiale di propagazione.

Ciò si ripercuote positivamente sui costi di esercizio orari e ad ettaro, diminuiti del 8,23%.

Cantiere di abbattimento del pioppo quinquennale – abbattitrice andanatrice CRA ING

Il consumo di combustibile della trattrice è risultato di 29,88 kg/h, pari a 135,82 kg/ha e 0,68 kg/t (tabella 49).

Tabella 49 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata della trattrice abbinata all'abbattitrice quinquennale.

Consumi di esercizio		
Orario	kg/h	29,88
Per unità di superficie	kg/ha	135,82
Per tonnellata	kg/t	0,68

I costi di esercizio del cantiere sono risultati, invece, di 89,56 €/h, 407,13 €/ha e 2,04 €/t (tabella 50).

Tabella 50 – Costi di esercizio dell'abbattitrice andanatrice per pioppo quinquennale.

		Costi di esercizio		
	Acquisto	€/h	€/ha	€/t
Trattrice (90 kW)	72791	66,49	302,25	-
Abbattitrice	40000	23,07	104,89	0,52
Cantiere	112791	89,56	407,13	2,04

Cantiere di raccolta e cippatura del pioppo biennale e quinquennale con cippatrice semovente Spapperi

Il consumo orario di combustibile della semovente e dei trattori è risultato di 51,79 kg e 23,90 kg. I consumi per unità di superficie e a tonnellata variano invece in funzione della tipologia di prodotto raccolto (tabella 51). Per quanto concerne la raccolta del biennale fresco e andanato, il consumo di combustibile della sola semovente è risultato di 60,93 kg/ha e 1,02 kg/t, a cui vanno aggiunti i consumi delle trattrici per un totale di 89,05 kg/ha e 1,48 kg/t.

Per quanto concerne la raccolta del quinquennale andanato, il consumo di combustibile della sola semovente è risultato di 287,73 kg/ha e 1,49 kg/t, a cui vanno aggiunti i consumi delle trattrici per un totale di 420,53 kg/ha e 2,16 kg/t.

Tabella 51 – Consumi orari, ad ettaro e a tonnellata dei diversi cantieri considerati.

	Consumi di esercizio		Semovente	Trattrici	Totale
	Orario	kg/h	51,79	23,90	75,69
BIENNALE FRESCO E ANDANATO	Per unità di superficie	kg/ha	60,93	28,12	89,05
	Per unità di prodotto	kg/t	1,02	0,47	1,49
QUINQUENNALE ANDANATO	Per unità di superficie	kg/ha	287,73	132,80	420,53
	Per unità di prodotto	kg/t	1,48	0,68	2,16

Il costo di esercizio orario dei trattori è risultato di 126,69 € mentre quello riferito alla semovente è risultato di 181,91 € nel caso della raccolta del pioppo andanato (sia biennale che quinquennale) e 213,64 € nel caso della raccolta del pioppo biennale in piedi.

I costi per unità di superficie e a tonnellata variano in funzione della tipologia di prodotto raccolto (tabella 52).

Per quanto concerne il pioppo biennale andanato, i costi di esercizio ad ettaro e a tonnellata della raccoglitrice sono risultati di 214 € e 3,57 €, a cui vanno aggiunti i costi delle trattrici e dei rimorchi per un totale di 363,06 €/ha e 6,03 €/t. Leggermente superiori, invece, i costi di raccolta del prodotto in piedi, in virtù del minor utilizzo annuo della testata: 251,34 €/ha e 4,19 €/t per la raccoglitrice e 392,94 €/ha e 6,53 €/t per l'intero cantiere.

I costi di esercizio della semovente in raccolta di pioppo quinquennale andanato, infine, sono risultati di 1010,62 €/ha e 5,20 €/t, per un totale, considerando le trattrici e i rimorchi, di 1549,55 €/ha e 8,46 €/t.

Tabella 52 – Costi di esercizio dei diversi cantieri considerati.

	Costi di esercizio		Semovente	Trattrici con rimorchio	Totale
BIENNALE FRESCO	Per unità di superficie	€/ha	251,34	141,60	392,94
	Per unità di prodotto	€/t	4,19	2,34	6,53
BIENNALE ANDANATO	Per unità di superficie	€/ha	214,01	149,05	363,06
	Per unità di prodotto	€/t	3,57	2,46	6,03
QUINQUENNALE ANDANATO	Per unità di superficie	€/ha	1010,62	538,93	1549,55
	Per unità di prodotto	€/t	5,20	3,26	8,46

DISCUSSIONI

I limiti tecnici e operativi della meccanizzazione oggi disponibile sul mercato hanno portato allo sviluppo di una serie di innovazioni tecnologiche in grado di migliorare uno o più aspetti della filiera agro energetica.

Il pioppo è una delle specie maggiormente utilizzate per la costituzione di piantagioni a scopi energetici e le fasi d'impianto e di raccolta costituiscono una voce considerevole dei costi di produzione. L'abbattimento di tali costi favorisce il raggiungimento di un ritorno economico adeguato. Attualmente, nessuna delle trapiantatrici commerciali equipaggia sistemi automatici o semiautomatici di alimentazione del materiale di propagazione. Il dispositivo automatico di alimentazione delle talee e la trapiantatrice semiautomatica di astoni garantiscono l'esecuzione del lavoro con un minor numero di operatori e con costi inferiori, questi ultimi ridotti di oltre l'otto per cento (risparmio corrispondente alla manodopera non impiegata). L'introduzione di automatismi consente anche di incrementare la superficie annua dominata/uomo e il numero di talee anno impiantate/uomo (tabella 53). Considerando, infatti, un impiego annuo della macchina di 275 ore, la superficie annua impiantata/uomo passa da 45-55 ha a 82,5 ha, con un incremento del 50% rispetto alle trapiantatrici Berto, Oliver, Allasia T1, Spapperi TTP/2 e dell'80% rispetto alla trapiantatrice Rotor (la meno performante).

Tabella 53 – Operatività delle trapiantatrici.

	Spapperi TTP/2 con sistema automatico	Spapperi TTP/2	Berto	Allasia T1	Oliver	Rotor
ha/h	0,60					0,5
ha/anno	165					137,5
ha anno ⁻¹ uomo ⁻¹	82,5	55				45,83
Talee/h	4020					3350
Talee/anno	1105500					921250
Talee anno ⁻¹ uomo ⁻¹	552750	368500				307083

Per quanto concerne il trapianto semiautomatico di astoni, inoltre, si evidenziano una maggiore uniformità e regolarità d'impianto e un notevole miglioramento delle condizioni di lavoro. La deposizione manuale dell'astone induce un certo margine di errore (che tende ad aumentare con le ore di lavoro), sia per quanto concerne la distanza di trapianto sulla fila (due metri), sia per quanto riguarda la verticalità dell'astone nel terreno. Questi due aspetti, fondamentali ai fini della buona regolarità dell'impianto e per la successiva fase di raccolta, sono notevolmente migliorati poiché regolati da un dispositivo meccanico e non dalla manualità dell'operatore. Dal punto di vista ergonomico il sistema proposto garantisce condizioni operative sicuramente migliori. Nel cantiere tradizionale il prelievo del materiale avviene in posizione eretta e la sua deposizione in posizione flessa. Il cantiere semiautomatico, diversamente, consente di eseguire entrambe le azioni in posizione seduta, con evidente riduzione dell'affaticamento.

Tra le raccogliatrici impiegabili nella raccolta in una fase, la testata semiportata Spapperi RT evidenzia costi di esercizio orari e a ettaro inferiori a quelli del cantiere Claas e del cantiere con semovente Spapperi (tabella 54). I costi di raccolta per unità di prodotto, invece, a causa della bassa capacità di lavoro operativa della testata semiportata sono più alti: 7,36 €/t contro 6,93 €/t del cantiere Claas e 6,53 €/t del cantiere Spapperi con semovente (figura 36).

Tabella 54 – Costi di esercizio orari e a ettaro dei cantieri per la raccolta delle SRF.

	Cantiere		
	Claas	Spapperi RT	Spapperi semovente
€/h	411,47	212,17	340,33
€/ha	417,43	385,77	392,94

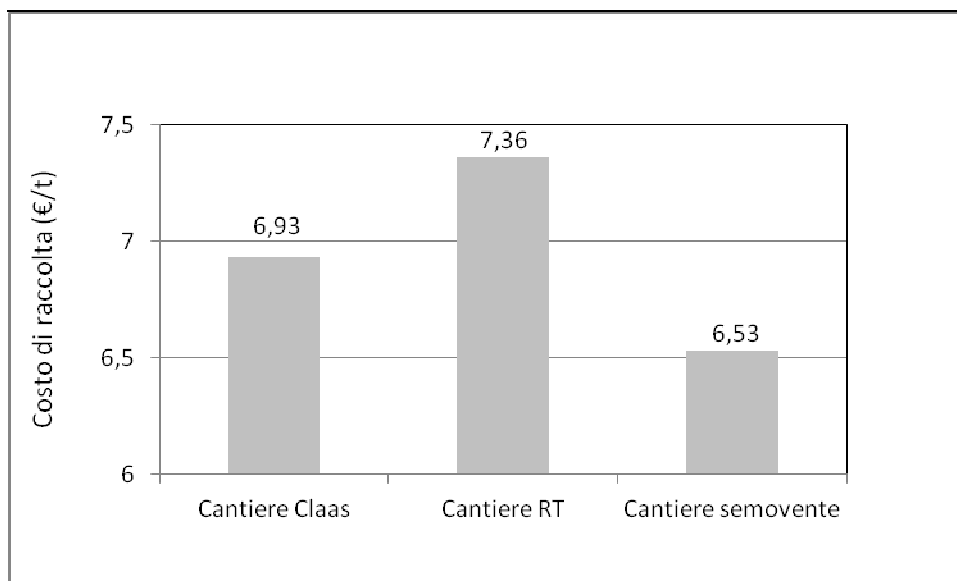


Figura 36 – Costi di raccolta a tonnellata dei diversi cantieri.

La semovente Spapperi è una macchina progettata esclusivamente per le colture energetiche ed è in grado di operare sia su colture a breve e media rotazione, sia su prodotto fresco o andanato. Il suo utilizzo, inoltre, sembrerebbe garantire costi di raccolta a tonnellata più contenuti. Per tali ragioni la semovente Spapperi potrebbe essere considerata la migliore soluzione tecnica per il mercato delle biomasse. Le ipotesi operative relative alle prestazioni della macchina su pioppo biennale, tuttavia, devono trovare un riscontro oggettivo in campo, valutandone anche l'efficienza e l'affidabilità nel lungo periodo affinché possano essere fatti confronti con macchine commerciali, a elevata efficienza, come la Claas Jaguar. La scelta del cantiere ottimale, in ogni caso, deve prendere in considerazione anche altri aspetti quali la superficie annua da raccogliere, la superficie annua dominabile e il capitale iniziale che è necessario o possibile investire (figura 37).

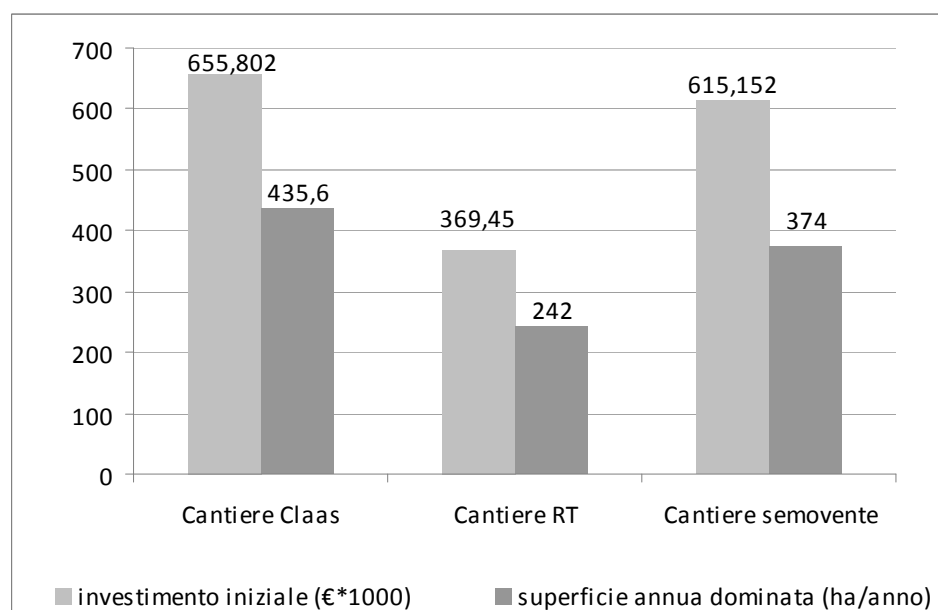


Figura 37 – Investimento iniziale e superficie annua dominata da ciascuna macchina.

Il cantiere Spapperi RT, difatti, richiede un investimento iniziale sensibilmente inferiore rispetto alle altre soluzioni e, in presenza di superfici frammentate e compresori energetici di limitata estensione, potrebbe risultare l'unica scelta conveniente. Il cantiere Claas, diversamente, consente di dominare una maggiore superficie annua e può operare anche su colture tradizionali (food).

Poiché la raccolta in due fasi richiede il passaggio di una macchina in più rispetto ai cantieri tradizionali, i costi delle operazioni di raccolta devono essere mantenuti a un livello sostenibile e il più vicino possibile al metodo tradizionale. Per tale ragione la capacità di lavoro operativa delle macchine dovrebbe essere sufficientemente elevata da consentire il contenimento dei costi complessivi di gestione.

I costi di raccolta rilevati utilizzando la meccanizzazione disponibile sono risultati piuttosto elevati e ben superiori a quelli concernenti la raccolta in una fase. L'abbattitrice commerciale Mantovani, l'unica realizzata, evidenzia costi di abbattimento e andatura di 107,70 €/ha e 1,94 €/t. Il cantiere di cippatura delle andane con la Spapperi RT modificata presenta costi di raccolta di 442,03 €/ha e 10,98 €/t per un costo complessivo di 549,73 €/ha e 12,92 €/t. Gli sviluppi tecnologici dell'ultimo biennio hanno consentito di raggiungere diversi obiettivi attraverso l'introduzione dell'abbattitrice andatrice CRA ING e della cippatrice semovente Spapperi con testata pick up. Le macchine, infatti,

garantiscono una maggiore capacità di lavoro operativa rispetto alle soluzioni sopra discusse, consentendo di incrementare la superficie annua dominata e di ridurre i costi di raccolta. In termini operativi, ad esempio, l'incremento di superficie annua dominabile da ciascuna macchina è risultata del 151% e del 77%, rispettivamente per l'abbattitrice CRA ING e la semovente con testata pick up (figura 38).

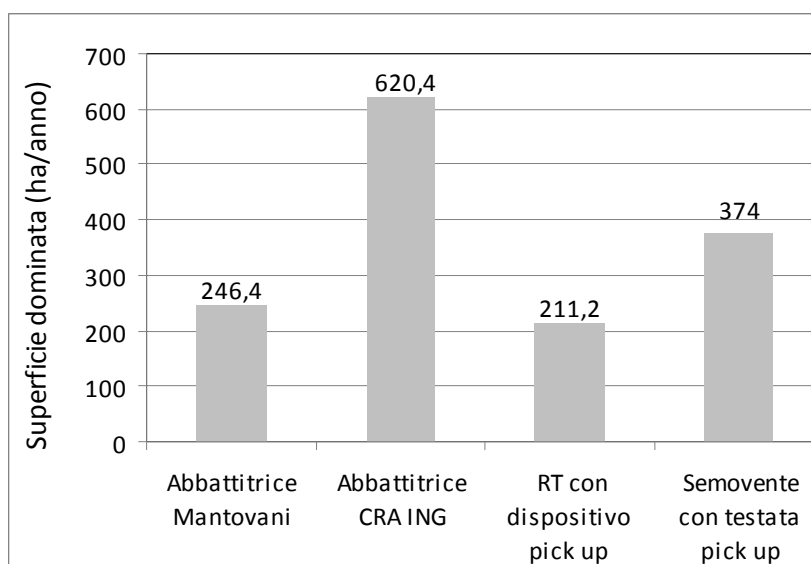


Figura 38 – Superficie annua dominata dalle diverse macchine.

I costi di abbattimento e andatura possono essere ridotti di oltre il 50%, attestandosi a 48,09 €/ha e 0,89 €/t mentre quelli di cippatura, a ettaro e a tonnellata, possono essere ridotti rispettivamente del 5,71% e 18,18%, essendo pari a 363,06 €/ha e 6,03 €/t, per un totale di 411,15 €/ha e 6,92 €/t. La possibilità di contenere i costi di raccolta del cantiere in due fasi entro 6,92 €/t rende tale cantiere competitivo con quello tradizionale, essendo tale valore di poco superiore a quello riferito all'utilizzo della semovente Spapperi e praticamente equivalente a quello del cantiere Claas (figura 39).

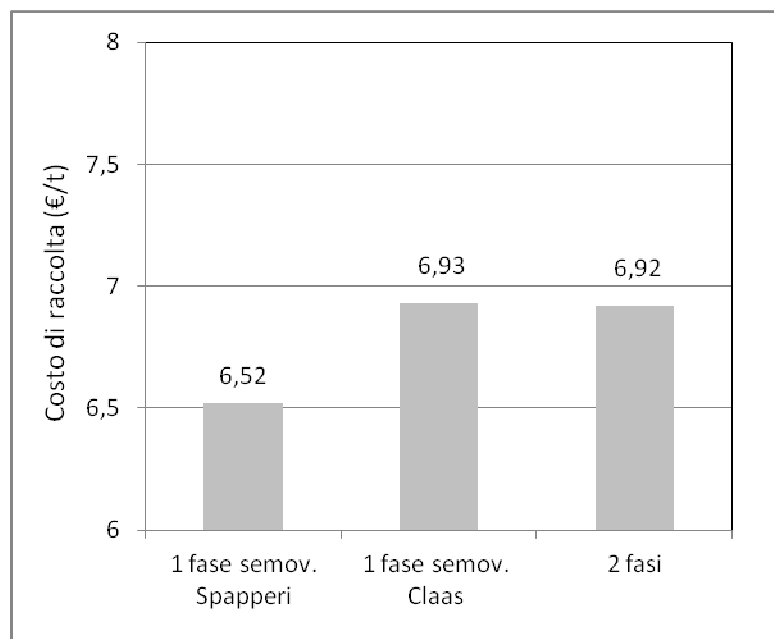


Figura 39 – Costi di esercizio a tonnellate dei diversi cantieri.

L'introduzione di una metodologia di raccolta innovativa richiede un'approfondita analisi di tutti i parametri che influenzano, direttamente o indirettamente, il processo produttivo. L'operatività dell'abbattitrice andanatrice per pioppo biennale, proprio a causa della tipologia di lavoro che la macchina è tenuta a eseguire, è fortemente influenzata dalle caratteristiche dendrometriche delle piantagioni. Come confermato da diversi studi condotti sia in Italia sia all'estero, le produttività del pioppo allevato a SRF possono variare sensibilmente, a parità di turno di ceduzione. Appare chiaro, quindi, che il campo di utilizzo della macchina, concettualmente sviluppata per operare la raccolta d'impianti biennali (R2F2, R4F2, R6F2 ecc.), non può essere valutato in funzione del solo ciclo colturale, ma deve essere riferito anche a determinati parametri dendrometrici. Le sperimentazioni condotte hanno consentito di identificare con approccio scientifico le relazioni esistenti tra la capacità di lavoro dell'abbattitrice e diversi livelli di sviluppo e produttività degli impianti. Le correlazioni proposte, risultate statisticamente significative, evidenziano la possibilità di operare efficientemente su impianti caratterizzati da un livello di produttività non superiore alle 15 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹. Valori superiori alle 15 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ implicano la gestione di tempi di manutenzione via via crescenti e, di conseguenza, l'impossibilità di compiere le operazioni di taglio e andanatura entro margini operativamente ed economicamente sostenibili.

Lo stoccaggio del prodotto nell'interfila fino a fine maggio primi di giugno permette di ridurre sensibilmente il contenuto di umidità delle piante prima della trinciatura, anche a seguito di precipitazioni tardo primaverili. Il cippato proveniente dalle piante disidratate, rispetto a quello ottenuto dalle piante fresche, si caratterizza per un maggior rendimento in fase di combustione e una maggiore stabilità in fase di stoccaggio, grazie alla minore tendenza del prodotto ad andare incontro a fenomeni di fermentazione e a perdita di sostanza secca. Lo studio condotto ha permesso di descrivere, attraverso una curva predittiva, il processo di disidratazione del pioppo stoccato nell'interfila. Il modello, stimato con una regressione parabolica e risultato statisticamente significativo a un livello $p < 0,01$, indica che è possibile raggiungere valori di umidità del 40%, 35% e 30% rispettivamente in 80, 93 e 103 giorni di stoccaggio. Utilizzando la curva sopra descritta è quindi possibile pianificare in maniera dettagliata gli interventi di raccolta in funzione di specifiche richieste dell'impianto di trasformazione.

Le macchine utilizzate per la raccolta del pioppo in piedi possono operare anche la raccolta del pioppo andanato nell'interfila, montando anteriormente specifiche testate pick up. Lo studio condotto ha evidenziato la possibilità di ottenere un cippato con caratteristiche granulometriche differenti in funzione del contenuto di umidità delle piante raccolte e del dispositivo di trinciatura utilizzato (figura 40).

Passando dalle piante fresche alle piante disidratate, infatti, la distribuzione granulometrica del cippato prodotto dalla Claas Jaguar tende a spostarsi verso le classi più grandi, essendo incrementata la percentuale di prodotto di dimensioni comprese tra 45 e 16 mm (dal 59,33% al 66,72%) e diminuita quella di dimensioni inferiori a 16 mm (dal 32,72% al 24,50%). La Spapperi RT evidenzia, invece, un comportamento opposto con una riduzione della percentuale di prodotto ricadente nella classe 45 – 16 mm (dal 66,68% al 62,68%) e un incremento della percentuale di prodotto ricadente nella classe 16 – 3,15 mm (dal 23,20% al 30,60%). Indipendentemente dalla macchina impiegata, il cippato proveniente dal pioppo disidratato in andana si caratterizza per la minore quantità d'impurità.

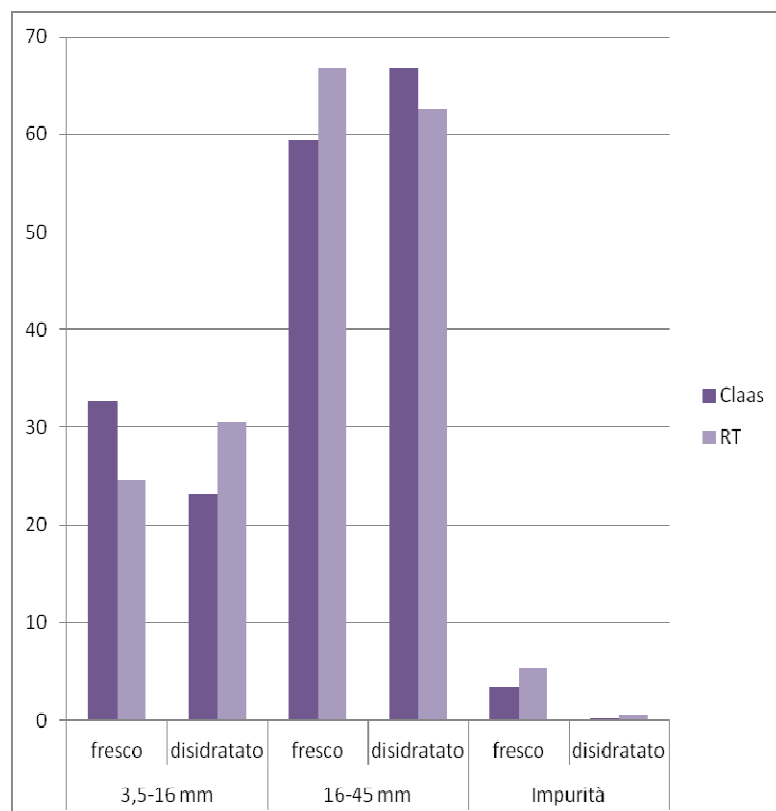


Figura 40 – Distribuzione granulometrica del cippato proveniente da piante fresche e disidratate.

Spesso a causa del limitato periodo utile per la raccolta si è costretti a operare su terreni con bassa portanza, causando gravi danni da compattamento. La sperimentazione condotta ha permesso di definire gli effetti prodotti sul terreno dal passaggio delle macchine utilizzate per la raccolta delle SRF, sia nel caso del cantiere tradizionale in un singolo passaggio, sia nel caso del cantiere in due fasi distinte. Le prove hanno evidenziato il minor grado di compattamento del terreno prodotto dall'abbattitrice andanatrice nei confronti delle altre macchine operatrici, in tutti gli strati esaminati, sia superficiali sia profondi, ma anche la necessità di abbinare l'abbattitrice a trattrici equipaggiate con pneumatici a sezione più larga, al fine di massimizzare i benefici offerti dal suo utilizzo (figura 41).

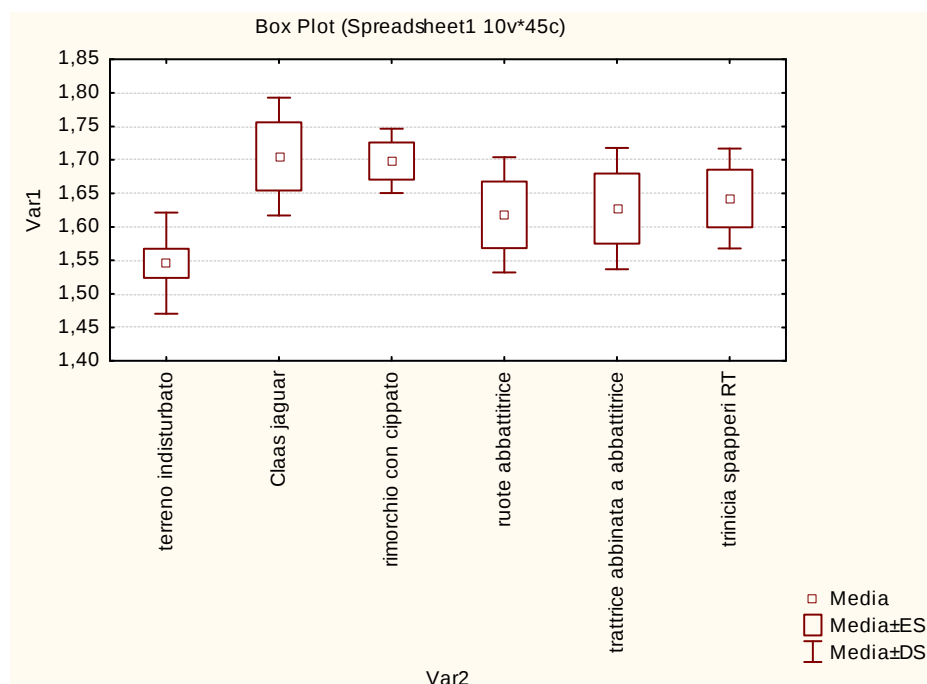


Figura 41 - Massa volumica apparente del terreno prima (TI) e dopo il passaggio delle macchine.

L'ultima considerazione riguarda la possibilità di posticipare il transito delle raccogliatrici con pick up e dei rimorchi trainati dai trattori tra la fine di maggio e i primi di giugno. Le macchine, in tale periodo, si trovano a operare su terreni generalmente più asciutti e quindi caratterizzati da una maggiore portanza. Il pick up montato anteriormente alle raccogliatrici, inoltre, incrementa la superficie di contatto col terreno, riducendo ulteriormente gli effetti del compattamento. Non bisogna dimenticare, infine, che il cippato prodotto dalla trinciatura delle piante andanate si caratterizza per una massa volumica apparente inferiore (per il minore contenuto di umidità) e, pertanto, a parità di volume si riduce il peso del prodotto trasportato.

Per quanto concerne la raccolta del pioppo quinquennale, le prime esperienze condotte con il cantiere proposto evidenziano costi di abbattimento e andanatura di 407,13 €/ha e 2,04 €/t (4,81 €/t s.s.), costi di cippatura delle andane di 1010,62 €/ha e 5,20 €/t (12,27 €/t s.s.) e costi di esercizio dei dumper di 538,38 €/ha e 3,26 €/t, con un costo di raccolta complessivo di 1956,13 €/ha e 10,50 €/t.

Il ricorso alla meccanizzazione forestale nella raccolta del pioppo quinquennale (Spinelli et al. 2006a) comporta costi sensibilmente superiori rispetto a quelli riferibili al nuovo cantiere (12,50 €/t s.s. per l'abbattimento, 20,50 €/t s.s. per la cippatura) tuttavia, le

diverse metodologie utilizzate per il calcolo dei costi di esercizio e le differenti produttività delle piantagioni (198 t/ha vs 108 t/ha), non consentono di eseguire un confronto diretto in termini di costi a tonnellata. Una comparazione interessante può essere effettuata confrontando la capacità di lavoro effettiva delle diverse abbattitrici, espressa come numero di piante abbattute per ora, al netto dei tempi morti e di manutenzione. Nel confronto sono state prese in considerazione due abbattitrici commerciali in grado di operare su piante di diametro inferiore a 400 mm, abbinabili a motrici non specializzate: l'abbattitrice-accumulatrice Davco QC 1400, applicata a un minicaricatore cingolato Bobcat T300 e l'abbattitrice-accumulatrice Naarva Grip 1600-40 E, applicata a un escavatore gommato Caterpillar 315.

Il prototipo CRA ING (abbinato nella prova a una trattrice da 95 kW), con una capacità di lavoro operativa di 0,22 ha/h, ha mostrato una più alta velocità di lavoro essendo in grado di abbattere circa 360 alberi/ora rispetto a circa 200 alberi/ora delle due abbattitrici commerciali (Tabella 55).

Tabella 55 – Confronto operativo tra abbattitrici forestali e abbattitrice andanatrice CRA ING
*modificato da Spinelli et al.

	Macchine		
	Abbattitrice accumulatrice	Abbattitrice accumulatrice	Abbattitrice andanatrice
Modello	Davco QC 1400*	Naarva Grip 1600-40 E*	Prototipo CRA-ING
Specie	<i>Populus alba</i>	<i>Populus alba</i>	(<i>P. x generosa</i>) x <i>P. nigra</i>
Clone	Villa franca	Villa franca	Monviso
Sesto d'impianto (m)	3x2	3x2	3x2
Età (anni)	5	5	5
Diametro a 1,30 m (cm)	9,8	9,7	14,10
Peso delle singole piante (kg)	54	52	119
Dispositivo di taglio	Disco	Cesoia	Disco
Diam. massimo di taglio (cm)	35	32	30
Piante abbattute (n° piante/h)	205	197	360

La significativa differenza rilevata in termini di prestazioni può essere messa in relazione con la tipologia di cantiere proposto, che prevede una diversa gestione delle operazioni di raccolta. Le due abbattitrici forestali, infatti, provvedevano all'accumulo e allo stoccaggio

intermedio di 5 filari alla volta, mentre l'abbattitrice CRA ING eseguiva direttamente il taglio e il rilascio del prodotto nell'interfila, senza necessità di movimentare la biomassa dal letto di caduta.

Per quanto concerne la semovente con testata pick up, la soluzione tecnica proposta consente di operare con una capacità di lavoro operativa di 0,18 ha/h, potendo cippare un quantitativo di biomassa pari a 35 t/h. La macchina è in grado di raccogliere da terra le piante precedentemente abbattute e rilasciate nell'interfila consentendo l'esecuzione della cippatura in fase dinamica. Il cippato man mano prodotto può essere scaricato direttamente sui rimorchi dei trattori (foto 58), analogamente a quanto avviene nella raccolta in una fase del pioppo biennale. Inoltre è possibile scaricare il cippato sul cassone posteriore della semovente durante l'avvicendamento dei trattori, riducendo i tempi morti e incrementando la produttività del cantiere.



Foto 58 – Cantiere di raccolta in parallelo del pioppo quinquennale andanato.

Le macchine sviluppate per la raccolta del pioppo quinquennale rappresentano un'importante innovazione nel settore della meccanizzazione dedicata alle colture energetiche. Il loro utilizzo, in alternativa ai cantieri tradizionali, consentirebbe di ridurre sensibilmente i tempi di utilizzazione e i costi di raccolta. Un'ultima considerazione riguarda la possibilità di sfruttare in maniera più razionale il parco macchine disponibile

nelle aziende di media estensione. L'abbattitrice può essere abbinata, infatti, a qualsiasi trattrice agricola di media potenza e lo stesso gruppo cippatore è stato concepito come modulo indipendente, in modo da poter essere abbinato a trattori di potenza adeguata.

CONCLUSIONI

L'Italia, più di altri paesi, risente della dipendenza dal petrolio a causa del prezzo attuale dell'energia elettrica e del greggio.

Un maggior uso delle biomasse come fonte energetica consentirebbe di ridurre la dipendenza energetica verso i paesi terzi e le emissioni inquinanti e dei gas a effetto serra. Verrebbe inoltre contrastato il fenomeno dell'abbandono delle zone rurali e montane con ricadute occupazionali.

Il ruolo della ricerca nel settore della meccanizzazione agricola è quello di individuare e sviluppare soluzioni e innovazioni tecnologiche con un approccio scientifico, orientando il processo produttivo verso la semplificazione delle diverse fasi, l'uso razionale dei mezzi a disposizione e l'ottimizzazione dei risultati. Le piantagioni dedicate, soprattutto a causa della contrazione del comparto agricolo e dell'incertezza del mercato, svolgono un ruolo di primo piano nell'ambito delle fonti rinnovabili. Le fasi di impianto e raccolta costituiscono una voce importante del bilancio economico di una coltura rappresentando fino all'ottanta per cento dei costi di produzione complessivi. Lo sviluppo di una nuova macchina trova giustificazione nel momento in cui viene garantito il miglioramento di uno o più parametri del ciclo produttivo, quali la riduzione dei costi di produzione, il miglioramento della qualità del lavoro, il miglioramento delle caratteristiche qualitative del prodotto ottenuto, la riduzione della fatica e/o degli infortuni, la riduzione dell'impatto ambientale. Altri aspetti da prendere in considerazione riguardano i costi sempre più elevati della manodopera, la sempre minore disponibilità della stessa e la necessità di eseguire i lavori con tempestività, vista la stagionalità delle colture e dei relativi interventi.

Uno degli aspetti più interessanti della ricerca riguarda il trasferimento delle competenze e delle conoscenze acquisite agli utenti finali. Il settore delle agro energie è relativamente giovane e le ditte meccaniche necessitano di un supporto tecnico e un approccio scientifico che solo il mondo della ricerca è in grado di offrire.

L'attività di dottorato è stata incentrata proprio sullo sviluppo di macchine, sistemi e processi innovativi, fornendo supporto tecnico scientifico alla ditta meccanica coinvolta nella progettazione e realizzazione dei diversi prototipi e svolgendo anche le necessarie valutazioni dei benefici, diretti e indiretti, derivanti da un loro possibile utilizzo.

Partendo dalla fase di impianto, l'introduzione nel mercato del dispositivo automatico di alimentazione delle talee e della trapiantatrice semiautomatica di astoni consentirebbe di ridurre i costi di oltre l'otto per cento e di incrementare la superficie dominata anno/uomo di almeno il 50%. La trapiantatrice semiautomatica di astoni, inoltre, presenta anche altri vantaggi legati alla maggiore precisione delle fasi di deposizione e interrimento del materiale di propagazione e alle migliori condizioni di lavoro del personale.

La raccolta del pioppo a ciclo quinquennale, basata sull'utilizzo di macchine forestali più o meno specializzate, presuppone una ben precisa organizzazione del lavoro, generalmente strutturato in diverse fasi quali il taglio, l'accumulo, l'esbosco, l'accatastamento e la cippatura. Le innovazioni prodotte (abbattitrice andanatrice per pioppo quinquennale e cippatrice semovente con testata pick up) prevedono, invece, una diversa gestione delle operazioni di raccolta, semplificando e velocizzando le operazioni di utilizzazione: abbattimento e andanatura nell'interfila, cippatura delle andane in fase dinamica. I primi risultati sembrerebbero confermare una possibile riduzione dei costi di raccolta e dei tempi di utilizzazione. Basti pensare che la sola abbattitrice semiportata è in grado di provvedere al taglio e alla deposizione in andana con una capacità di lavoro nettamente superiore rispetto a quella fatta registrare, in altri studi, da macchine di concezione più tradizionale. Le operatrici sviluppate possono essere abbinate a trattrici di potenza adeguata e ciò consente di migliorare la gestione e lo sfruttamento del parco macchine aziendale. Il cantiere proposto, infine, può essere impiegato anche nella raccolta di altre essenze arboree e nei diradamenti delle specie consociate in arboricoltura da legno.

L'utilizzo della nuova cippatrice semovente anche nel cantiere in una fase, inoltre, sembrerebbe garantire costi di raccolta a tonnellata inferiori del 6% rispetto al cantiere Claas.

Nell'ambito della raccolta in due fasi, l'introduzione di macchine innovative quali l'abbattitrice andanatrice CRA ING e la cippatrice semovente con testata pick up comporta diversi benefici, riconducibili sia alla riduzione dei costi complessivi di raccolta che alla maggiore superficie annua dominabile. Nello specifico risulta possibile incrementare la superficie annua dominata dall'abbattitrice e dalla cippatrice rispettivamente del 151% e del 77%. Questi dati sono molto significativi, soprattutto se si considera la necessità di eseguire la raccolta in una finestra temporale piuttosto ridotta.

Per quanto concerne l'aspetto economico, inoltre, i costi di raccolta a tonnellata del cantiere in due fasi risultano fortemente contratti (-50% per l'abbattimento e -18% per cippatura delle andane) attestandosi agli stessi livelli del cantiere in una fase con falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar, risultato, questo, di grande impatto e assolutamente non ipotizzabile fino a due anni fa.

L'introduzione di una metodologia di raccolta innovativa, come quella in due fasi con stoccaggio nell'interfila, richiede anche un'approfondita analisi di tutti i parametri che influenzano, direttamente o indirettamente, il processo produttivo. L'indagine condotta ha permesso di definire i limiti funzionali e operativi dell'abbattitrice, valutati sia in termini di sviluppo diametrico medio massimo delle piante (pari a 100 mm), sia in termini di produttività massima degli impianti da raccogliere (pari a 15 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹). Il prodotto stoccato nell'interfila va incontro ad un naturale processo di disidratazione, che porta a raggiungere contenuti di umidità inferiori al 40% in circa 80 giorni. La possibilità di prevedere l'andamento di tale processo nel tempo consente di pianificare in maniera dettagliata gli interventi di raccolta, potendo conferire il prodotto in funzione di specifiche richieste della centrale energetica. L'impianto di trasformazione potrebbe ad esempio necessitare, in alcuni periodi dell'anno, di un prodotto con un contenuto di umidità inferiore al 30% da miscelare con un cippato proveniente da altre essenze e caratterizzato da livelli di umidità ben più elevati o viceversa. Lo studio condotto ha messo in evidenza anche la possibilità di ottenere, a parità di macchina cippatrice utilizzata, prodotti qualitativamente differenti in funzione del contenuto di umidità delle piante. Questi aspetti meritano particolare attenzione, specie per gli effetti che la pezzatura riveste nelle fasi di stoccaggio, alimentazione e combustione.

Il cantiere in due fasi nasce anche allo scopo di salvaguardare la risorsa suolo da processi di compattamento e destrutturazione causati dal passaggio delle macchine su terreni caratterizzati da una bassa portanza. L'utilizzo della sola abbattitrice produce un minore compattamento degli strati superficiali e profondi rispetto a quanto fatto registrare dalle macchine tradizionalmente impiegate nella raccolta in una fase. La possibilità di posticipare l'ingresso delle trinciatrici e dei dumper a fine maggio primi di giugno garantisce, inoltre, condizioni di trafficabilità migliori rispetto alla stagione invernale. Il cippato ottenuto, infine, essendo caratterizzato da una massa volumica apparente inferiore rispetto al prodotto fresco, può essere trasportato trasmettendo sul terreno un carico

inferiore. La scelta del sistema di raccolta dipende, ad ogni modo, dalle circostanze e dal contesto produttivo in cui l'azienda è chiamata ad operare. Diversi fattori possono influenzare la scelta del metodo di raccolta e della macchina da impiegare: le condizioni climatiche (inverni piovosi o secchi), le piante (età, ciclo, diametro), il suolo (struttura, composizione, presenza di un sistema di drenaggio efficiente), le dimensioni delle piantagioni e il tipo di prodotto richiesto (proprietà chimiche e fisiche della biomassa, periodo di conferimento). La flessibilità deve essere la parola "chiave". Il sistema di raccolta deve essere valutato caso per caso e programmato di conseguenza, in modo da garantire una fornitura continua e dimensionata per quelle che sono le capacità di ricezione dell'impianto di trasformazione.

Sarebbe auspicabile, quindi, integrare le nuove tecnologie e i nuovi sistemi di lavoro con altri più tradizionali. In tale ottica è possibile, ad esempio, pensare all'utilizzo delle falciatrinciacaricatrici classiche per un primo approvvigionamento della centrale, da effettuarsi nei periodi invernali in condizioni meteo e di trafficabilità ottimali e ricorrere, invece, alla raccolta in due fasi nei periodi particolarmente piovosi e su terreni dotati di scarsa portanza, provvedendo in tal caso ad effettuare la sola operazione di abbattimento e rinviando la cippatura delle andane all'inizio dell'estate. Discorso del tutto analogo può essere impostato considerando determinate specifiche della centrale relativamente alle caratteristiche del prodotto in entrata, quali ad esempio il contenuto di umidità, la pezzatura e le impurità.

Tutte le macchine sviluppate e presentate in questo studio sono frutto di un'intensa attività sperimentale e, nonostante le interessanti potenzialità evidenziate, occorre ricordare che la loro collocazione sul mercato presuppone ulteriori sviluppi tecnici in grado di migliorarne l'affidabilità operativa nel lungo periodo, cosa che potrà avvenire esclusivamente a cura della ditta costruttrice.

Ai fini della ricerca risulterebbe quindi auspicabile condurre prove sperimentali di impianto e raccolta con le macchine definitive che, ovviamente, pur seguendo i principi funzionali delle precedenti versioni prototipali possono risultare estremamente differenti sul piano tecnico. Qualsiasi innovazione o nuovo orientamento colturale presuppone dei rischi derivanti dall'uso di nuove tecnologie. Da qui la necessità di prevedere anche la nascita di nuove figure professionali, nuove competenze e, soprattutto, di un'attenta

formazione, elemento essenziale ai fini di un corretto e “controllato” utilizzo dei prodotti innovativi.

BIBLIOGRAFIA

1. AA.VV., 2011a. Macchine operatrici – Prezzi nuovo. Supplemento all'Informatore Agrario 17.
2. AA.VV., 2011b. Trattatrici, falciatrinciacaricatrici e mietitrebbie. Prezzi nuovo e usato. Supplemento all'Informatore Agrario 43.
3. Abdallah R, Auchet Sb, Méausoone PJ, 2011. Experimental study about the effects of disc chipper settings on the distribution of wood chip size. *Biomass and Bioenergy* 35(2):843-852.
4. Aebiom 2011. Annual statistical report on the contribution of biomass to the energy systems in the EU 27.Bruxelles, Belgium. p.107.
5. Agostinetto L, Barella L, Dimartino S, Francescato V, Antonini E, 2007. La raccolta e la prima trasformazione della biomassa legnosa, cap. 2:30-121. In “La produzione di biomasse legnose a scopo energetico – Approfondimenti tecnici di filiera”. Ed. Veneto agricoltura.
6. Albissen G, Helmut Ammann H, 2008. Coûts-machines, coûts occasionnés par les parties du bâtiment et les installations mécaniques. *Rapports ART* 702:4-43.
7. Andersson G, Asikainen A, Björheden R, Hall PW, Hudson JB, Jirjis R, 2002. *Production of forest energy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
8. Arpa Piemonte, 2001. Rapporto sullo stato dell'ambiente in Piemonte (http://www.arpa.piemonte.it/reporting/rapporto-stato-ambiente/rsa-2001/suolo_2001/at_download/file).
9. Balsari P, Airoidi G, Facciotto G, 2002. Messa a dimora di un impianto di pioppo da biomassa. Valutazioni tecnico-economiche di quattro trapiantatrici. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 81:49-54.
10. Baraldi G, 1980. Organizzazione e misurazione del lavoro. Quaderno di appunti alle lezioni di Tecnica della meccanizzazione agricola. Università di Bologna. 57 pp.
11. Baraldi G, Capelli G, 1973. Elementi tecnici per il calcolo del costo di esercizio delle macchine agricole. *Genio rurale*. Vol. XXXVI:37-73.
12. Bedane AH, Afzal MT, Sokhansanj S, 2011. Simulation of temperature and moisture changes during storage of woody biomass owing to weather variability. *Biomass and Bioenergy* 35(7):3147-3151.

13. Bergante S, Facciotto G, 2006. Impianti annuali, biennali, quinquennali. Produttività e costi in alcune realtà del nord Italia. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 128:25-30.
14. Bergante S, Facciotto G, Minotta G, 2010. Identification of the main site factors and management intensity affecting the establishment of Short-Rotation-Coppices (SRC) in Northern Italy through Stepwise regression analysis. *Central European Journal of Biology* 5(4):522-530.
15. Bidini M, 2004. Attrezzature & Servizi. Novità e notizie. *Tecnico & Pratico*. Supplemento a *Sherwood – Foreste ed Alberi Oggi* 1.
16. Bolli P, Scotton M, 1987. Lineamenti di tecnica della meccanizzazione Agricola. *Edagricole*. p. 49.
17. Brammer JG, Bridgwater AV, 2002. The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP system. *Biomass and Bioenergy* 22(4):271-281.
18. Camera di commercio Roma - Listino prodotti petroliferi 2009 (<http://www.rm.camcom.it>).
19. Capelli G, 1989. Il costo del lavoro meccanizzato. *Macchine e motori agricoli* 4:24.
20. Castro G, Reni N, Zanuttini R, 2006. Compensato e nuovi possibili sviluppi dal legno di pioppo. *Alberi e Territorio* 1/2:37.
21. CEN/TS 15149-1:2006. Solid biofuels. Methods for the determination of particle size distribution - Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 3,15 mm and above.
22. Ceulemans R, Deraedt W, 1999. Production Physiology and growth potential of poplars under short rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management* 121:9-24.
23. Christopherson NS, Mattson JA, 1990. Mechanization of the operational aspects of short-rotation forestry. *Biomass* 22:123-133.
24. Chum R, Overend R, 2001. Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology* 71:187-195.
25. Cielo P, Settembri P, Zanutti R, 2002. I cantieri di utilizzazione del pioppo. Sistemi di lavoro, tempi e produttività. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 81:55-60.
26. Cielo P, Zanutti R, 2004. La raccolta del legno nei pioppeti. *L'Italia forestale e montana* 59 (6):467-482.

27. Cielo P, Zanutti R, 2007. Utilizzazione del pioppeto con harvester. Due cantieri a confronto. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 133:37-42.
28. Council of the European Union, 2003. Council Regulation (EC) No 1782/2003 of 29 September 2003 establishing common rules for direct support schemes under the common agricultural policy and establishing certain support schemes for farmers and amending Regulations (EEC) No 2019/93, (EC) No 1452/2001, (EC) No 1453/2001, (EC) No 1454/2001, (EC) 1868/94, (EC) No 1251/1999, (EC) No 1254/1999, (EC) No 1673/2000, (EEC) No 2358/71 and (EC) No 2529/2001. Bruxelles, Belgio.
29. Culpin C, 1975. Profitable Farm Mechanization. Granada Publishing Co, London. pp. 290-292.
30. Culshaw D, Stokes B, 1999. Mechanization of short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 9(1-5):127-140.
31. Della Casa R, 1992. Costo di Esercizio delle Macchine Agricole, Estratto da Strumenti per l'Economia Agraria Operativa. Editrice Club Bologna.
32. Dickmann DI, Stuart KW, 1983. The Culture of Poplars in Eastern North America. Michigan State University, East Lansing, MI. 168 pp.
33. Dillen SY, Marron N, Bastien C, Ricciotti L, Salani F, Sabatti M, Pinel MPC, Rae AM, Taylor G, Ceulemans R. 2007. Effects of environment and progeny on biomass estimations of five hybrid poplar families grown at three contrasting sites across Europe. *Forest Ecology and Management* 252(1-3):12-23.
34. Doldi ML, 2009. Ritorno al suolo. *Imprese Agricole*. p. 28.
35. Facciotto G, Bergante S, Lioia C, Mughini G, Nervo G, Giovanardi R, 2005. Short Rotation Forestry in Italy with poplar and willow. In "Proceedings of the 14th European Biomass Conference and exhibition", Parigi, Francia. pp. 320-323.
36. Fiala M, Bacenetti J, 2009. Trapianto per pioppo da biomassa. Esperienza in un impianto a ceduzione quinquennale. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 158:35-40.
37. Gigler JK, Van Loon WKP, Van den Berg JV, Sonneveld C, Meerdink G, 2000. Natural wind drying of willow stems. *Biomass and Bioenergy* 19(3):153-163.
38. Hansen EA, 1991. Poplar woody biomass yields: a look to the future. *Biomass and Bioenergy* 1:1-7.
39. Hartmann H, Böhm T, Jensen PD, Temmerman M, Rabier F, Golser M, 2006. Methods for size classification of wood chips. *Biomass and Bioenergy* 30(11):944-953.

40. Hillring B, 1997. Price trends in the Swedish wood-fuel market. *Biomass and Bioenergy* 12:41-51.
41. ITABIA, 1999. Guide book on how to grow Short Rotation Forestry to produce Energy in an environmentally sustainable manner, Altener Programme BIOGUIDE Project, Final Report of the Environmental Liaison Group. pp. 1-40.
42. ITABIA. Report 2008: Goals for bioenergies in Italy. Report for the Italian Ministry for the environment, land and Sea (<http://www.itabia.it/pdf/rapporto2008eng.pdf>).
43. Jirjis R, Eriksson L, Gustavsson L, 1995. Comparative analysis of wood chips and bundles – Costs, carbon dioxide emissions, dry-matter losses and allergic reactions. *Biomass and Bioenergy* 9(1-5):181-190.
44. Junginger M, De Visser E, Hjort-Gregersen K, Koornneef J, Raven R, Faaij A, Turkenburg W, 2006. Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy* 34:4024-4041.
45. Kauter D, Lewandowski I, Claupein W, 2003. Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use - a review of the physiological basis and management influences. *Biomass and Bioenergy* 24(6):411-427.
46. Kristensen EF, Kofman PD, Jensen PD, 2003. Counter pressure on ventilation of different types of wood chip and chunkwood. *Biomass and Bioenergy* 25(4):399-408.
47. Liang T, Khan MA, Meng Q, 1996. Spatial and temporal effect in drying biomass for energy. *Biomass and Bioenergy* 10(5-6):353-360.
48. Makeschin F, 1999. Short Rotation Forestry in Central and northern Europe - Introduction and Conclusions. *Forest Ecology and Management* 121:1-7.
49. Manzone M, Airoldi G, Facciotto G, Balsari P, 2006. Trapiantatrici per impianti da biomassa, prestazioni e costi di alcuni modelli. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 128:49-55.
50. Mareschi L, Paris P, Sabatti M, Nardin F, Giovanardi R, Manazzone S, 2005. Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono produttività interessanti. *L'Informatore Agrario* 18:49-53.
51. McKenzie WM, 1960. Fundamental aspects of the wood cutting process. *Forest Products Journal* 10(9):447-457.
52. McKenzie WM, Karpovich H, 1968. The frictional behaviour of wood. *Wood Science & Technology* 2(2):139-152.

53. Minotta G, Muzzi E, 2007. Indagini su cedui di pioppo a turno breve nella pianura ferrarese. *L'Italia forestale e montana* 62 (5/6): 411-419.
54. Mitchell CP, 1995. New cultural treatments and yield optimisation. *Biomass and Bioenergy* 9(1-5):11-34.
55. Mitchell CP, Kofman PD, Angus-Hankin CM, 1997. Guidelines for conducting harvesting trials in short rotation forestry. In: *Forestry Research Paper*, vol 1. Aberdeen University Ed. 50 pp.
56. Mitchell CP, Stevens EA, Watters MP, 1999. Short-rotation forestry operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* 121(1-2):123-136.
57. Nati C, Spinelli R, Fabbri P, 2010. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy* 34(5):583-587.
58. Nord-Larsen T, Bergstedt A, Farver O, Heding N, 2011. Drying of firewood and the effect of harvesting time, tree species and shelter of stacked wood. *Biomass and Bioenergy* 35(7):2993-2998.
59. Nurmi J, 1995. The effect of whole tree storage on the fuel wood properties of short rotation salix crops. *Biomass and Bioenergy* 8(4):245-249.
60. Nurmi J, Hillebrand K, 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. *Biomass and Bioenergy* 31(6):381-392.
61. Pari L, 1999. Development of a short rotation woody crops (SRWC) harvester suitable for the temperate regions. In "Proceedings of the World Renewable Energy Congress", Perth, Australia. pp. 39-42.
62. Pari L, Civitarese V, 2008. Una tagliallineatrice per raccogliere il pioppo intero. *Energia rinnovabile, supplemento all'Informatore Agrario* 31:34-35.
63. Pari L, Civitarese V, 2009. Falcitrinciacaricatrice Spapperi riveduta e corretta. *Energia rinnovabile, supplemento all'Informatore Agrario* 5:18-22
64. Pari L, Civitarese V, Del Giudice A, 2009a. Claas Jaguar 890 e 860, prove di raccolta su pioppo. *Agroenergie dall'impianto alla raccolta, supplemento n. 1 all'Informatore Agrario* 29:31-33.
65. Pari L, Civitarese V, Suardi A, 2009b. I vantaggi di stoccare il pioppo a bordo campo. *Agroenergie dall'impianto alla raccolta, supplemento n. 1 all'Informatore Agrario* 29:38-40.

66. Pari L, Fedrizzi M, 2004. Provata una nuova trapiantatrice per le colture forestali energetiche. *L'Informatore Agrario* 43:95-98.
67. Paris P, Mareschi L, Sabatti M, Pisanelli A, Ecosse A, Nardin F, Scarascia-Mugnozza G, 2011. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: Survival, growth and yield. *Biomass and Bioenergy* 35:1524-1532.
68. Paulrud S, Nilsson C, 2004. The effects of particle characteristics on emissions from burning wood fuel powder. *Fuel*. 83:813–821.
69. Pettersson M, Nordfjell T, 2007. Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass and Bioenergy* 31:782-792.
70. Piccioni E, Bonari E, 2006. SRF di pioppo nella pianura litoranea toscana. Principali risultati di alcune esperienze a lungo periodo. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 128:31-36.
71. Raida J, 2005. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 28:193–201.
72. Regione Campania, 2001. La compattazione dei suoli – Foglio divulgativo di pedologia
(<http://www.agricoltura.regione.campania.it/pedologia/pdf/compattazione.pdf>)
73. Röser D, Mola-Yudego B, Sikanen L, Prinz R, Gritten D, Emer B, 2011. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass and Bioenergy* 35:4238-4247.
74. Salvati R, Chirici G, Corona P, 2007. Modello di valutazione dell'attitudine fisica del territorio per la realizzazione di impianti cedui da biomassa in Italia. *L'Italia forestale e montana* 5/6:399-410.
75. Spinelli R, 2004. L'harvester in Italia. *L'Italia forestale e montana* 59(6):512-523
76. Spinelli R, Hartsough BR, 2006. Harvesting SRF poplar for pulpwood: Experience in the Pacific Northwest. *Biomass and Bioenergy* 30:439-445.
77. Spinelli R, Magagnotti N, Nati C, Pretolani R, Peri M, 2006a. Raccogliamo l'energia. *Evasfo Evaluation Short Rotation Forestry. L'innovazione nella raccolta meccanizzata di biomasse arboree*. Ed. Regione Lombardia Agricoltura 54. 64 pp.
78. Spinelli R, Magagnotti N, Picchi G, 2007. La cippatrice Jordan RH 25 al lavoro sulle potature di olivo. *L'Informatore Agrario* 41:55-58.
79. Spinelli R, Nati C, Magagnotti N, 2006b. SRF di pioppo – Macchine e sistemi per la raccolta. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 128:56-59.

80. Spinelli R, Nati C, Magagnotti N, 2009. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass and Bioenergy* 33:817-821.
81. Spinelli R, Nati C, Magagnotti N, Picchi G, 2008. Harvesting poplar medium rotation coppice with light equipment. In “23th International Poplar Commission (IPC, FAO), Pechino, China. p.168.
82. Spinelli R, Nati C, Pari L, Mescalchin E, Magagnotti N, 2012. Production and quality of biomass fuels from mechanized collection and processing of Vineyard pruning residues. *Applied Energy* 89:374-379.
83. Spinelli R, Verani S, 2000. La raccolta del legno per uso energetico industriale. Atti del convegno “La produzione di legno a fini energetici nei boschi e nei campi”. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 59:43-48.
84. Stupak A, Asikainen A, Jonsel M, Karlton E, Lunnan A, 2007. Sustainable utilisation of forest biomass for energy - Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries. *Biomass and Bioenergy* 31:666-684.
85. Suadicane K, Gamborg C, 1999. Fuel quality of whole-tree chips from freshly felled and summer dried Norway spruce on a poor sandy soil and a rich loamy soil. *Biomass and Bioenergy* 17:199-208.
86. Timmons D, Mejía CV, 2010. Biomass energy from wood chips: Diesel fuel dependence? *Biomass and Bioenergy* 34:1419-1425.
87. UNI EN 14774-2:2009. Solid biofuels. Determination of moisture content. Oven dry method (Part 2): Total moisture - Simplified method.
88. UNI EN 15103:2009. Solid biofuels Determination of bulk density.
89. Verani S, Sperandio G, 2003. Utilizzazione del pioppeto. Impiego di un diverso grado di meccanizzazione. *Sherwood – Foreste ed alberi oggi* 88:37-44.
90. Verani S, Sperandio G, 2004. Valutazione tecnico economica dell’impiego della meccanizzazione del pioppeto. *EM-Linea Ecologica* 36(6):61-64.
91. Verani S, Sperandio G, 2006. Meccanizzazione avanzata nella raccolta del pioppeto. Quali margini di convenienza economica? *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 122:31-35.
92. Verani S, Sperandio G, 2007. Meccanizzazione spinta in pioppeto. Analisi di un cantiere. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 137:29-33.

93. Verani S, Sperandio G , Di Matteo G, 2010. Analisi del lavoro della Claas Jaguar 880 con testata GBE-1 nella raccolta di un pioppeto da biomassa. *Forest@* 7:22-27.
94. White H, 1980. A heteroskedasticity - consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica* 48:817-838.
95. Wu MR, Schott DL, Lodewijks G, 2011. Physical properties of solid biomass. *Biomass and Bioenergy* 35:2093-2105.