

# Linee guida per la gestione della filiera del pellet da biomasse residuali e piantagioni dedicate



A cura di  
Vincenzo Civitarese, Giulio Sperandio, Andrea Acampora





## **PROGETTO AGROENER**

Energia dall'agricoltura: innovazioni sostenibili per la  
bioeconomia

Finanziamento MASAF (ex MiPAAF), D.D. n. 26329 del 1/04/2016.

(<http://agroener.crea.gov.it/>)

### **Linee guida per la gestione della filiera del pellet da biomasse residuali e piantagioni dedicate**

A cura di

Vincenzo Civitarese, Giulio Sperandio, Andrea Acampora

Roma, Luglio 2023

## **Linee guida per la gestione della filiera del pellet da biomasse residuali e piantagioni dedicate**

Pubblicazione realizzata dal Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA) nell'ambito delle attività previste dal Task 5.2 del progetto AGROENER: Energia dall'agricoltura: innovazioni sostenibili per la bioeconomia (Finanziamento MiPAAF D.D. n. 26329 del 1/04/2016).

### **Autori**

Vincenzo Civitarese - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

Giulio Sperandio - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

Andrea Acampora - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

Francesco Gallucci - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

Beatrice Vincenti - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

Monica Carnevale - CREA, Ingegneria e Trasformazioni Agroalimentari

### **Editore**

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)

Il manuale è scaricabile in formato pdf accedendo al sito ufficiale del progetto <http://agroener.crea.gov.it/>.

ISBN: 9788833852836

---

# Indice

---

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>5</b>
<b>2. IL PROGETTO AGROENER</b> .....	<b>7</b>
<b>3. IL MERCATO DEL PELLET</b> .....	<b>9</b>
<b>4. IL PROCESSO DI PELLETTIZZAZIONE</b> .....	<b>12</b>
4.1 Il sistema di pellettizzazione aziendale.....	<b>13</b>
<b>5. TIPOLOGIE DI BIOMASSE IMPIEGATE</b> .....	<b>17</b>
5.1 Reperimento e caratterizzazione del materiale .....	<b>19</b>
<b>6. IL PROCESSO PRODUTTIVO</b> .....	<b>24</b>
6.1 Disidratazione .....	<b>24</b>
6.2 Cippatura, raffinazione e perdite di prodotto durante il processamento .....	<b>30</b>
6.3 Pellettizzazione .....	<b>34</b>
6.4 Effetti del processo produttivo sul contenuto di umidità finale .....	<b>37</b>
<b>7. ANALISI QUALITATIVA DEL PELLET PRODOTTO</b> .....	<b>40</b>
7.1 Pellet di pioppo SRF di 3, 6 e 9 anni .....	<b>42</b>
7.2 Pellet da residui forestali: pino eldarica, eucalipto e pino radiata .....	<b>46</b>
7.3 Pellet da residui agricoli di nocciolo e ulivo .....	<b>49</b>
7.4 Pellet da residui del verde urbano: platano, leccio, pino domestico ed eucalipto .....	<b>52</b>
<b>8. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI</b> .....	<b>55</b>
<b>9. IL PRETRATTAMENTO TERMICO DELLA BIOMASSA – ALLEGATO TECNICO</b> .....	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>69</b>

---

## 1. PREMESSA

---

Una filiera energetica coinvolge diversi attori, dai proprietari delle risorse ai trasformatori, imprese di trasporto e rivenditori oltre, ovviamente, agli utilizzatori finali. Una filiera locale presenta enormi vantaggi, soprattutto logistici, con ricadute positive sui comprensori territoriali. È importante conoscere la tipologia e il quantitativo di biomassa disponibile, individuare i potenziali fornitori, il numero di utenti interessati al prodotto e garantire determinati livelli di qualità. Di grande interesse sono i progetti dimostrativi, specie se svolti in cooperazione con aziende pubbliche che, di fatto, evidenziano innegabili vantaggi comunicazionali, attraverso riunioni, pubblicazioni, fiducia istituzionale.

Il presente manuale è frutto dell'attività svolta nell'ambito del progetto di ricerca AGROENER, Work Package 5 "Realizzazione impianti sperimentali, dimostrazioni e divulgazione", Task 5.2 "Produzione dimostrativa di pellet su piccola scala per la valorizzazione della biomassa di diversa origine". L'obiettivo principale del task 5.2 era quello di valorizzare materiali lignocellulosici di varia natura attraverso la promozione di un modello dimostrativo di produzione di pellet su scala aziendale. Nello specifico, sono state condotte attività di recupero, essiccazione, raffinazione e pellettizzazione di biomasse di origine forestale, residui di potatura di nocioleti e oliveti, piantagioni di pioppo a ciclo breve, medio, lungo e residui di potatura del verde urbano.

Dopo il processo di addensamento sono state valutate le principali caratteristiche qualitative del prodotto ottenuto, fornendo un quadro completo ed esaustivo delle potenzialità offerte dal mercato del pellet relativamente alle tipologie di biomasse selezionate. Per le finalità del Task 5.2 sono risultate indispensabili le attività condotte parallelamente nell'ambito dei Task 2.4 (valorizzazione delle biomasse forestali residuali), 2.5 (recupero di residui lignocellulosici da gestione del verde urbano), 5.1 (dimostrazione e divulgazione sull'uso della biomassa da piantagioni dedicate e da formazioni forestali di prossimità territoriale).

Il manuale fornisce una serie di strumenti in grado di supportare scelte imprenditoriali orientate verso la produzione e la fornitura sostenibile di biomasse solide trasformate, focalizzando l'attenzione sulle opportunità offerte dal mercato del pellet, sulle potenzialità e i limiti di impiego di un'ampia varietà di materiali residuali. In tal senso il progetto supporta il settore agricolo e forestale nella diversificazione delle proprie attività ordinarie, con la possibilità di trarre vantaggio sia

dall'impiego di attrezzature aziendali già in dotazione, compatibili quindi con il processo produttivo, sia di valorizzare materiali e sottoprodotti delle normali attività agro-forestali raggiungendo i requisiti qualitativi richiesti dai consumatori.

*Vincenzo Civitarese*



---

## 2. IL PROGETTO AGROENER

---

Nel 2016 il MIPAAF ha finanziato il progetto AGROENER “Energia dall’agricoltura. Innovazioni sostenibili per la bioeconomia” (MiPAAF, D.D. N. 26329 del 1/04/2016 – scadenza progetto 31/12/2023). L’obiettivo generale del progetto era quello di rispondere all’esigenza di riduzione della dipendenza dai combustibili fossili, di contribuire alla mitigazione del clima, di favorire l’utilizzo di fonti efficienti ed ambientalmente sostenibili, di trasferire al settore agricolo innovazioni di prodotto, di processo e le competenze acquisite nella ricerca.

Il progetto si articolava all’interno del comparto delle agro-bio-energie sviluppando, nei suoi 5 work package (WP), tematiche riguardanti: l’efficienza energetica di macchine ed impianti; l’utilizzo delle biomasse solide (sottoprodotti agroforestali); il recupero dei sottoprodotti agroindustriali per la filiera del biogas; l’utilizzo di colture dedicate come matrice per l’estrazione di biocombustibili e/o biolubrificanti nei cicli produttivi delle bioraffinerie integrate; azioni di dimostrazione e trasferimento delle conoscenze in merito allo sviluppo di impianti di microgenerazione con analisi della sostenibilità e delle principali criticità.

Il WP1 si inseriva nel programma finanziario dell’Unione Europea “Horizon2020”, con l’obiettivo di migliorare e sviluppare l’efficientamento energetico, sia delle macchine che delle strutture agricole, con programmi innovativi e migliorativi delle caratteristiche e delle performance della componentistica di base. Altre azioni miravano allo sviluppo di prototipi di trattori ad alimentazione esclusiva o combinata a biometano o ad elevata automazione mentre altre erano finalizzate ad implementare algoritmi multivariati per la stima predittiva dei consumi.

Costituiva il punto centrale del WP2 lo sviluppo della filiera delle biomasse solide agroforestali, tramite l’introduzione di sistemi innovativi e/o l’utilizzo di nuove soluzioni tecniche per la produzione di energia. Da questo punto di vista risulta fondamentale il ruolo del fattore meccanizzazione delle operazioni di raccolta, carico, trasporto, scarico e stoccaggio.

Il WP3 affrontava il problema sia del recupero delle biomasse residuali per la produzione e la valorizzazione di colture dedicate, sia degli aspetti meccanici ed impiantistici per la valorizzazione del digestato per la filiera del biogas. Il tema dell’innovazione era centrale all’interno del progetto ed il WP4 andava ad integrare le nuove conoscenze operando nel comparto delle bioraffinerie con l’obiettivo di studiare, sperimentare e sviluppare alcune soluzioni innovative di processo (smart-

technologies) per la produzione di bio-based, oltre a valutare le colture oleaginose non alimentari per l'autoproduzione aziendale di biocarburanti.

Infine, il WP5 aveva come obiettivo generale quello di realizzare impianti sperimentali affiancati da azioni dimostrative e divulgative, di diversa origine e funzionalità.

*Giulio Sperandio*

---

### 3. IL MERCATO DEL PELLETT

---

L'uso delle energie rinnovabili è aumentato costantemente nel tempo a causa della necessità di mitigare i cambiamenti climatici, riducendo l'uso dei combustibili fossili [1,2] responsabili del costante aumento della concentrazione di gas a effetto serra nell'atmosfera [3].

Lo scenario precedente, rappresentato dall'obiettivo 20-20-20, viene sostituito da uno nuovo che indica la soglia del 27% come contributo di rinnovabili al mix energetico europeo, insieme alla riduzione del 40% dei gas serra entro il 2030. In questo ambito, l'utilizzo per scopi energetici della biomassa residuale diventa un'opzione fondamentale e strategica.

Sebbene le biomasse siano un argomento di grande interesse, il loro utilizzo a livello industriale non ha ottenuto l'attenzione che merita, probabilmente a causa di una serie di fattori riconducibili, principalmente, alla bassa densità energetica, alla dispersione della materia prima, alla disponibilità in forme poco convenienti e ai costi di trasporto elevati [4].

Un modo per superare alcuni dei limiti sopra esposti è quello di utilizzare processi di densificazione, tramite pellettizzazione e/o bricchettatura, rendendo quindi disponibile un biocarburante omogeneo, facile da usare e caratterizzato da una maggiore densità di energia [5,6]. Il cippato, ad esempio, viene conferito presso le centrali termiche ad un prezzo di mercato di circa 45-50 €/t sul fresco. Questo prodotto può essere tuttavia valorizzato attraverso un processo di pellettizzazione, destinando il materiale ad altri mercati ben più redditizi.

I prodotti trasformati, con particolare riferimento al settore del pellet, hanno fatto registrare un importante sviluppo, sia in termini di produzione, sia in riferimento al numero di impianti di trasformazione installati, con un prezzo di mercato del pellet che ha superato i 450 €/tonnellata nel 2020 [7]. Questo andamento si è mantenuto più o meno costante per tutto il 2021.

A partire dal 2022, il consolidarsi della crisi geopolitica tra Russia e Ucraina ha determinato il forte aumento dei costi energetici in genere (metano e molte altre materie prime) e questo ha fatto sì che il prezzo del pellet aumentasse di oltre il 100%. Un sacco da 15 kg è passato dai circa 5 – 5,5 euro del 2021 ai 12 euro in media di ottobre 2022 [8].

A livello europeo la produzione di pellet è cresciuta da 1,7 milioni di tonnellate del 2000 a 28 milioni di tonnellate nel 2015 [9], con un aumento annuo del 14% rispetto al 2011 [10]. Si stima che la domanda di pellet dal 2020 sarà di circa 50 milioni tonnellate all'anno [11] e il consumo di pellet

industriali crescerà costantemente ad un tasso del 21% all'anno mentre l'incremento del consumo di pellet domestico raggiungerà l'8,5% l'anno [6]. L'Europa è il principale produttore e consumatore di pellet, seguito dagli Stati Uniti e poi dal resto del mondo. L'Europa è anche un importatore netto globale di pellet di legno [9,12]: il più alto consumo di pellet si registra nel Regno Unito, in Finlandia e in Svezia, dove sono principalmente utilizzati per la produzione di elettricità e riscaldamento; altri importanti consumatori di pellet nell'UE sono il Belgio, i Paesi Bassi, la Danimarca e l'Italia [13].

Dal punto di vista della produzione, il Portogallo e la Lettonia sono i maggiori esportatori europei di pellet, seguiti da Germania, Lituania, Estonia, Finlandia e Svezia [14,15]. Nel 2016 l'energia termica ottenuta dall'utilizzo delle biomasse in Italia ammontava a circa 7,06 Mtep [16].

Il consumo principale del pellet, per il mercato italiano, è rappresentato soprattutto da piccole utenze private, con impiego prevalente di stufe e caldaie per il riscaldamento domestico centralizzato, con quasi un milione di apparecchi installati.

Il processo di produzione del pellet è un processo di estrusione che consiste nel sottoporre la biomassa, precedentemente essiccata, ad alte pressioni e temperature, comprimendola attraverso un foro di pochi millimetri e producendo piccoli cilindri che vengono tagliati alla lunghezza desiderata e successivamente raffreddati [17,18]. L'attività di produzione del pellet richiede esperienza e conoscenza dell'intero processo, dalla fase di approvvigionamento della biomassa grezza a quella di trasformazione.

Prima di poter procedere alla raffinazione e pellettizzazione è necessario avere un quadro chiaro ed esaustivo delle caratteristiche qualitative del materiale di partenza, del contenuto di umidità iniziale, del contenuto di umidità che è possibile raggiungere dopo un adeguato periodo di stoccaggio in campo, eventuali perdite di sostanza secca in funzione della durata dello stoccaggio e delle condizioni climatiche stagionali.

*Andrea Acampora*

---

## 4. IL PROCESSO DI PELLETTIZZAZIONE

---

*Vincenzo Civitarese, Andrea Acampora, Giulio Sperandio*

La qualità del pellet dipende dalla specie legnosa utilizzata, in considerazione del relativo contenuto di lignina e cellulosa, oltre che dalla frazione di pianta considerata, essendo che la composizione chimica, la struttura fisica e le proprietà della biomassa legnosa variano a seconda delle diverse parti della pianta. Altri fattori possono comunque influenzare la qualità del prodotto finale come, ad esempio, il tempo di permanenza della biomassa nella trafilatura, il livello di omogeneità iniziale (da cui l'importanza del processo di raffinazione), la temperatura raggiunta nella produzione, il contenuto di umidità iniziale, la presenza di additivi, la preparazione della materia prima nonché le fasi di insacchettamento, stoccaggio e trasporto.

Il processo di pellettizzazione prevede diverse fasi, dall'approvvigionamento e preparazione della materia prima alle varie fasi operative:

- essiccazione: la produzione del pellet è facilitata se si dispone di un prodotto con un contenuto di umidità iniziale del 12-14% (valori limite 10-15%). A tal fine, prima di procedere con la fase di raffinazione la biomassa deve essere sottoposta ad un procedimento di essiccazione, generalmente operata in appositi essiccatoi che impiegano gas caldi usati direttamente sulla biomassa o indirettamente per la trasmissione di calore;
- raffinazione: per realizzare un buon pellet il materiale di partenza deve essere raffinato, al fine di ottenere una pezzatura omogenea ed ottimale, aumentando in tal modo la superficie esposta delle particelle e favorendo la rottura della lignina. La biomassa, quindi, se non fornita direttamente sotto forma di segatura necessita di un processo di riduzione che può prevedere, in alcuni casi una prima fase di cippatura e una seconda fase di raffinazione in funzione del tipo di materiale di partenza. Alla fine del processo, in ogni caso, le dimensioni delle particelle non dovrebbero superare la lunghezza di 6 mm. Una buona raffinazione consente di ottenere un pellet uniforme, non grossolano e privo di fratture riconducibili alla discontinuità delle fibre stesse. Prima di procedere alla riduzione dimensionale della biomassa è buona norma rimuovere tutta una serie di impurità quali sassi, terra o addirittura

frazioni metalliche che, oltre a contaminare direttamente il pellet prodotto potrebbero danneggiare i macchinari;

- condizionamento: un certo contenuto idrico del materiale è indispensabile per poter procedere ad una corretta pellettizzazione in quanto l'acqua è responsabile della lubrificazione della trafilatura e della riduzione degli attriti generati durante la fase di estrusione. Appositi sensori possono rilevare eventuali criticità legate al contenuto idrico della materia prima e, nel caso i valori risultassero inferiori al 10%, l'umidità può essere aumentata trattando la biomassa con acqua o vapore. Quest'ultimo favorisce anche l'aumento della temperatura del materiale preparando meglio le particelle legnose alla successiva pellettizzazione, con un aumento della capacità legante. Se la materia prima di partenza è troppo umida, tuttavia, può formarsi uno strato di materiale compatto tra rulli e trafilatura, con conseguente otturazione dei fori di estrusione;
- pressatura: il materiale viene sottoposto a pressatura tramite una coppia di rulli che agiscono contro una matrice metallica (trafilatura), caratterizzata da una serie di fori posti a distanza regolare tra loro. I fori si caratterizzano per una prima parte di forma conica, che favorisce l'ingresso del prodotto, e da una seconda parte di forma cilindrica, che dà la forma al pellet. La compressione esercitata produce un innalzamento della temperatura, che supera i 90 °C, con una progressiva densificazione e plastificazione del materiale legnoso. In tali condizioni la lignina si scioglie e agisce da legante naturale tra le particelle andando a rivestire le fibre di cellulosa. Per questo motivo la qualità del pellet dipende molto dalla specie impiegata. La normativa non prevede l'uso di collanti o additivi chimici, tuttavia, consente l'impiego di additivi naturali quali, ad esempio, l'amido di mais e la farina, in percentuali non superiori al 2%.
- raffreddamento, vagliatura, insacchettamento: i pellet espulsi dalla trafilatura si caratterizzano per una elevata temperatura e devono subire un rapido processo di raffreddamento tramite ventilazione a temperatura ambiente. Tale operazione stabilizza il prodotto favorendone l'indurimento e un'ulteriore perdita di acqua. Con la vagliatura si eliminano tutte le particelle fini non addensate (la normativa prescrive che le polveri non eccedano l'1% in peso del prodotto commercializzato) e il pellet raffreddato e pulito dalle polveri viene pesato ed insacchettato. Quest'ultimo processo può essere gestito sia manualmente che automaticamente.

#### 4.1. Il sistema di pellettizzazione aziendale

Una linea per la produzione del pellet risulta strutturata con diversi componenti in grado di garantire l'automazione delle varie fasi operative, dall'essiccamento all'alimentazione fino alla pesatura e insacchettamento finale. Una linea completa deve prevedere, oltre al sistema di essiccazione (Allegato 1), i seguenti componenti:

- raffinatore con dosatore automatico;
- sistemi e ventole di aspirazione;
- valvole di dosaggio del materiale da trattare;
- pellettatrice;
- nastro trasportatore;
- sistema di vagliatura;
- sistema di raffreddamento;
- bilancia e insacchettatrice.

Per le finalità del progetto è stata implementata, presso la sede del CREA IT di Monterotondo (RM), una linea di pellettizzazione semplificata composta dai seguenti dispositivi:

- un raffinatore con tramoggia di carico;
- una macchina pellettatrice con tramoggia di carico;
- un sistema di depolverizzazione;
- un sistema di raffreddamento.

Per la raffinazione del materiale è stato acquistato un biotrituratore raffinatore BL-100 (Foto 1), alimentato da un motore elettrico da 3 kW (Foto 2), composto da una tramoggia di carico della lunghezza di 107 cm (imbocco 330 mm × 360 mm), un sistema di trinciatura e dal dispositivo di espulsione del prodotto raffinato (Foto 3). La raffinazione avviene tramite un rotore a singola lama e otto martelli dentati flottanti in acciaio temprato. Posteriormente al rotore sono montate tre palette necessarie a generare il ciclone per l'espulsione del materiale trattato.

Il biotrituratore è in grado di operare sia su materiale cippato che prodotto grezzo avente diametro massimo di 50-70 mm. Interposto tra il rotore e il collo di espulsione vi è il vaglio di raffinazione con maglie da 6 mm (Foto 4). L'ingombro a terra è di 1485 mm × 875 mm mentre l'altezza e il peso risultano pari, rispettivamente, a 1360 mm e 95 kg.

Per la pellettizzazione è stata acquistata una pellettatrice Master 380C (Foto 5). La trafila in acciaio (Foto 6) ha un diametro di 120 mm con 90 fori da 6 mm ciascuno. I due rulli posizionati superiormente, invece, hanno un diametro di 75 mm e si caratterizzano per la zigrinatura esterna. Tale caratteristica aumenta l'attrito che si crea tra rullo e biomassa durante la fase di schiacciamento, impedendo che il materiale da estrudere scivoli al di fuori della zona di pressione.

La struttura che include i rulli rimane fissa e la trafila ruota grazie all'azione di un propulsore elettrico da 4 kW (Foto 7). Questi rulli sono posizionati quasi a contatto con la trafila in maniera tale da pressare il materiale che si interpone tra di essi. La grande pressione che si sviluppa tramite questo processo consente al materiale di penetrare nei fori della trafila fino a compattarsi. L'azione a ciclo continuo di questo processo genera anche la successiva espulsione dei cilindretti.

La pellettatrice è fornita di una tramoggia di carico che garantisce una autonomia di circa 50 minuti. Al suo interno troviamo una coclea per il dosaggio e l'agitazione del prodotto (Foto 8), con variatore di giri, alimentata da un motore elettrico da 0,25 kW.

La pellettatrice, la tramoggia di carico ed i relativi motori elettrici sono montati su un telaio portante di profilati in metallo, con un ingombro esterno di 680 x 680 mm, un'altezza di 1900 mm e un peso complessivo di 221 kg.

La capacità di lavoro teorica della macchina è di 40/50 kg ora in funzione del materiale impiegato.

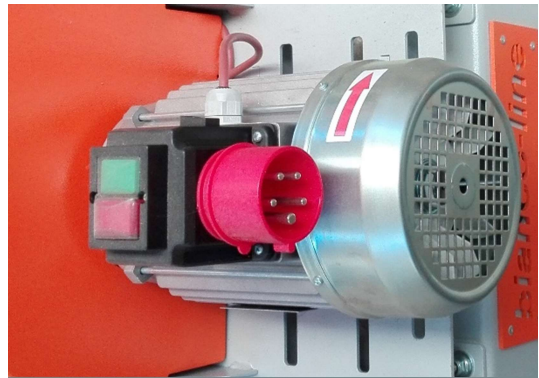
Il sistema di raffreddamento consiste in una ventola collocata in posizione frontale rispetto allo scivolo di espulsione del pellet (Foto 9). Un regolatore di flusso consente di uniformare il getto d'aria alle reali necessità di raffreddamento del prodotto. Lo scivolo ha lunghezza di 800 mm, una larghezza 220 mm ed è inclinato di circa 30° rispetto al piano orizzontale.

Il materiale raffreddato arriva, quindi, al sistema di depolverizzazione che consiste in un vibro vaglio con fori da 5 mm di diametro, dotato di un raccordo per l'accumulo e lo scarico delle polveri (Foto 10). La vibrazione viene prodotta da un motovibratore elettrico da 50 Hz).





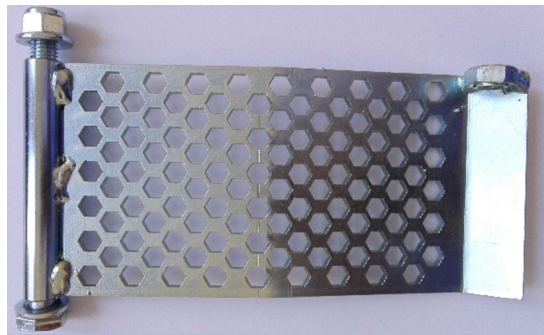
**Foto 1** – Biotrituratore raffinatoro BL-100



**Foto 2** – Motore elettrico da 3 kW



**Foto 3** - Dispositivo di espulsione.



**Foto 4** - Griglia di raffinazione



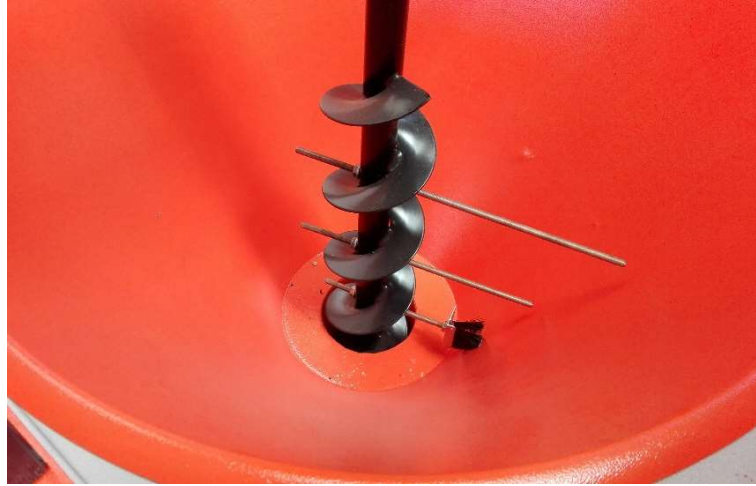
**Foto 5** - Pellettatrice Master 380C



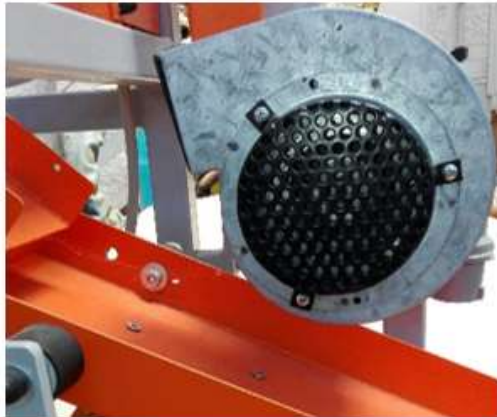
**Foto 6** - Gruppo rulli/trafila.



**Foto 7** - Propulsore elettrico da 4 kW



**Foto 8** - Tramoggia di carico equipaggiata con coclea per il dosaggio e l'agitazione del prodotto.



**Foto 9** - Dispositivo di raffreddamento.



**Foto 10** - Vibrovaglio con fori da 5 mm.

## 5. TIPOLOGIE DI BIOMASSE IMPIEGATE

*Giulio Sperandio, Andrea Acampora, Vincenzo Civitarese*

In Tabella 1 vengono indicate le tipologie di materie prime selezionate dallo standard ISO 17225-2 che possono essere impiegate per la produzione di pellet.

**Tabella 1** - Tipologie di legno ammesse per la produzione di pellet.

Classe A1	Classe A2	Classe B
Tronchi	Alberi interi senza radici	Boschi, piantagioni e altro legno vergine
Sottoprodotti e residui della lavorazione del legno non trattati chimicamente	Tronchi	Sottoprodotti e residui della lavorazione del legno non trattati chimicamente
	Residui di lavorazione forestale	Legno usato non trattato chimicamente
	Sottoprodotti e residui della lavorazione del legno non trattati chimicamente	

In questo studio sono state condotte prove di pellettizzazione impiegando le seguenti tipologie di biomasse:

- pioppo allevato a ciclo breve (3 anni),
- pioppo allevato a ciclo medio (5-7 anni),
- pioppo allevato a ciclo medio lungo (9 anni),
- biomassa di origine forestale,
- residui di potature di nocciolo e ulivo,
- residui della manutenzione del verde urbano.

Le piantagioni ad elevata densità hanno giocato un ruolo chiave nel panorama energetico nazionale a partire dagli anni 90 [19,20], con particolare riferimento al pioppo [21,22,23]. Negli anni, tuttavia, le superfici investite a short rotation forestry (SRF) hanno subito una sensibile riduzione [24,25] e quelle residue sono state proiettate verso un allungamento del ciclo di rotazione, passando dai 2-3 anni programmati a 5-6 fino a 9-10 anni [26]. Ciò si traduce in una elevata disponibilità di

biomassa per ettaro con caratteristiche qualitative decisamente superiori a quelle riscontrabili nelle rotazioni più brevi.

I residui derivanti da operazioni selvicolturali, quali i primi diradamenti (dove tutto il materiale viene cippato), i secondi diradamenti e il taglio del ceduo (dove gli scarti sono rappresentati da considerevoli quantità di cimali e ramaglia generalmente abbandonati in bosco), nonché i tagli di recupero di ampie superfici forestali investite da massicci attacchi di fattori biotici e da eventi meteorologici distruttivi [27], possono rappresentare una ulteriore e, spesso, ingente risorsa da recuperare e valorizzare.

La quantità di biomassa residuale potenzialmente ottenibile dalle potature dei frutteti dipende principalmente dal tipo di cultivar utilizzata, dal tipo di coltivazione e dalla frequenza con cui viene effettuata la potatura. Nella regione mediterranea la biomassa residuale fresca ottenuta dalla potatura degli oliveti varia da 2 a 7 t/ha [28], mentre la produzione di biomassa potenzialmente ottenibile dalla gestione delle coltivazioni di nocciole è di circa 1,5 t/ha [29]. Solo nella provincia di Viterbo sarebbe possibile ottenere oltre 60.000 tonnellate di biomassa all'anno da utilizzare, eventualmente, per la produzione di pellet. Anche in questo caso si evidenziano le potenzialità del settore.

Le biomasse legnose in ambito urbano rappresentano un'altra fonte di approvvigionamento di sicuro interesse, sia dal punto di vista economico che ambientale, la cui gestione rappresenta un costo non di poco conto, specie per le amministrazioni pubbliche. Secondo la Federazione italiana dei produttori di energia da fonti rinnovabili (Fiper), nel nostro paese la gestione del verde produce residui per circa 4 milioni di tonnellate/anno, una produzione, questa, per nulla trascurabile con un costo di smaltimento di circa 240 milioni di euro [30].

In questo contesto, quindi, i residui di potatura degli alberi e gli abbattimenti rappresentano la provenienza più interessante in quanto trattasi di legno vergine, raccolto da cantieri dedicati. L'utilizzo a fini energetici dei residui legnosi da verde urbano è stato oggetto di una controversa normativa, che ha dato origine a contraddittori provvedimenti legislativi. Purtroppo, nonostante la Legge 37/2019 avesse riaperto la normativa in materia di sfalci e potature, andando, di fatto, a modificare l'articolo 185 del d.lgs. 152/2006, il successivo D. Lgs. n. 116 del 2020 ripristina il concetto di rifiuto urbano per tali tipologie di biomassa, escludendo, di fatto, la possibilità di impiego per la produzione di energia [31].

## 5.1 Reperimento e caratterizzazione del materiale

### *Piantagioni di pioppo a ciclo breve, medio, lungo*

L'attività è stata svolta presso la sede del CREA-IT di Monterotondo (RM) e ha interessato la piantagione aziendale di pioppo SRF (clone AF6 - *Populus × euroamericana*), con fusti di età pari rispettivamente a 3 (Foto 11) e 6 anni (Foto 12), entrambi su ceppaie di 11 anni di età (R11F3 e R11F6) e fusti di 9 anni su ceppaie di 9 anni (R9F9).

I rilievi sono stati effettuati seguendo le linee guida proposte dalla Aberdeen University [32] ed hanno riguardato il diametro basale, l'altezza totale, il peso delle piante intere comprensive di rami e cimiali, il numero dei rami, il diametro di inserzione dei rami sul fusto e le relative lunghezze, il peso dei rami e dei cimiali e le relative analisi statistiche (Tabella 2).



**Foto 11** - Piantagione di pioppo a ciclo breve con 11 anni di radice e 3 anni di fusto (R11F3)



**Foto 12** - Piantagione di pioppo a ciclo medio con 11 anni di radice e 6 anni di fusto (R11F6)

Il diametro, l'altezza e il peso medio delle piante di 3 anni risultavano pari rispettivamente a 8,32 cm, 6,97 m e 19,62 kg, con valori minimi e massimi compresi tra 6,47 e 10,34 cm per i diametri, 6,04 e 7,69 m per le altezze e 11,5 e 30,85 kg per il peso. Le ramaglie e i cimiali rappresentavano il 17,65% della biomassa totale.

Il diametro, l'altezza e il peso medio delle piante di 6 anni risultavano pari rispettivamente a 16,09 cm, 13,07 m e 79,63 kg, con valori minimi e massimi compresi tra 12,70 e 20,50 cm per i diametri, 9,90 e 16,70 m per le altezze e 45,60 e 130,60 kg per il peso. Le ramaglie e i cimiali rappresentavano il 19,41% della biomassa totale.

Il diametro, l'altezza e il peso medio delle piante di 9 anni risultavano pari rispettivamente a 21,39 cm, 17,70 m e 183,92 kg, con valori minimi e massimi compresi tra 15,50 e 26,70 cm per i diametri, 11 e 22 m per le altezze e 74,26 e 310,15 kg per il peso. Le ramaglie e i cimali rappresentavano il 20,36% della biomassa totale.

**Tabella 2** - Principali parametri morfometrici rilevati nei tre cicli colturali (media  $\pm$  dev. st.). Diametro del fusto (One-Way Anova e Tuckey post hoc test):  $F = 66,97$ ,  $df=27$ ,  $p < 0,001$ ; altezza (Welch F test e Tuckey post hoc test):  $F = 253,1$ ,  $df = 16,15$ ,  $p < 0,001$ ; diametro di inserzione dei rami (Welch F test e Tuckey post hoc test):  $F = 8,997$ ,  $df = 16,1$ ,  $p < 0,01$ ; lunghezza dei rami (Welch F test e Tuckey post hoc test):  $F = 71,99$ ,  $df = 15,39$ ,  $p < 0,001$ ; diametro del cimale (One-Way Anova e Tuckey post hoc test):  $F = 82,41$ ,  $df = 27$ ,  $p < 0,001$ ; lunghezza dei cimali (Kruskal-Wallis e Mann-Whitney pairwise comparisons Bonferroni corrected):  $H = 21,83$ ,  $H_c = 21,87$ ,  $p < 0,001$ . Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$ .

Parametri	Pioppo triennale (media $\pm$ dev. st.)	Pioppo 6 anni (media $\pm$ dev. st.)	Pioppo 9 anni (media $\pm$ dev. st.)
Diametro basale del fusto (cm)	8,32 $\pm$ 1,34 <sup>c</sup>	16,09 $\pm$ 2,44 <sup>b</sup>	21,39 $\pm$ 3,46 <sup>a</sup>
Altezza totale (m)	6,97 $\pm$ 0,53 <sup>c</sup>	13,07 $\pm$ 0,74 <sup>b</sup>	17,70 $\pm$ 3,78 <sup>a</sup>
Numero rami (n.°)	44,60 $\pm$ 6,07	44,00 $\pm$ 8,51	11,40 $\pm$ 1,84
Diametro di inserzione dei rami (cm)	0,95 $\pm$ 0,46 <sup>b</sup>	1,40 $\pm$ 0,59 <sup>b</sup>	3,75 $\pm$ 2,12 <sup>a</sup>
Lunghezza dei rami (m)	0,94 $\pm$ 0,56 <sup>c</sup>	1,74 $\pm$ 0,70 <sup>b</sup>	3,34 $\pm$ 1,54 <sup>a</sup>
Diametro basale del cimale (cm)	2,24 $\pm$ 0,32 <sup>b</sup>	4,97 $\pm$ 0,12 <sup>a</sup>	4,88 $\pm$ 0,52 <sup>a</sup>
Lunghezza del cimale (m)	1,79 $\pm$ 0,24 <sup>b</sup>	3,38 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup>	3,89 $\pm$ 0,23 <sup>a</sup>
Peso fresco della pianta intera (kg)	19,62 $\pm$ 6,47	79,63 $\pm$ 25,53	183,92 $\pm$ 73,82
Peso fresco del solo fusto (kg)	16,34 $\pm$ 5,11	63,81 $\pm$ 16,15	147,65 $\pm$ 61,64
Peso fresco della ramaglia e del cimale (kg)	3,38 $\pm$ 1,48	15,06 $\pm$ 4,53	36,27 $\pm$ 12,53
Percentuale in peso del solo fusto (%)	82,35 $\pm$ 2,02	80,59 $\pm$ 2,73	79,64 $\pm$ 2,40
Percentuale in peso ramaglie e cimali (%)	17,65 $\pm$ 2,02 <sup>bc</sup>	19,41 $\pm$ 2,73 <sup>ac</sup>	20,36 $\pm$ 2,40 <sup>a</sup>

### Residui forestali

Le attività di recupero hanno interessato la sede del CREA-FL Centro di ricerca Foresta e Legno di Roma. In questo studio sono stati utilizzati topi residuali, della lunghezza di circa 1 m, provenienti da diradamenti al diciottesimo anno di età in cedui di eucalipto (Foto 13), pinete di pino eldarica e pino radiata. Il diametro medio del materiale è risultato rispettivamente pari a 11,96 ( $\pm$ 0,45) cm, 18,48 ( $\pm$ 0,9) cm e 16,5 ( $\pm$ 0,8) cm.

### Residui di potatura di nocioleti e uliveti

La raccolta dei residui di potatura di olivo e nocciolo è stata effettuata presso due aziende agricole localizzate nella provincia di Viterbo. L'uliveto (Foto 14), realizzato nel 1920 con piantine

della varietà Caninese, è stato impiantato con un sesto di 10 m × 10 m (100 p/ha) mentre il nocciolo (Foto 15), impiantato nel 1989 con Tonda Gentile Romana e Nocchione, si caratterizzava per un sesto di impianto di 6 m × 5 m (330 p/ha). I rilievi morfometrici hanno interessato, oltre al peso della biomassa asportata, il diametro dei rami potati, la loro lunghezza, l'altezza e il diametro delle singole piante (Tabelle 3 e 4).



*Foto 13 – Biomasse forestali residuali di eucalipto localizzate presso la sede del CREA-FL di Roma*



*Foto 14 - Potature di ulivo utilizzate per l'attività di ricerca*



**Foto 15** - Nocciolo utilizzato per l'attività di ricerca

Per l'olivo, il diametro e la lunghezza media dei rami sono risultati essere pari a 14,06 mm e 1,27 m. La quantità media di biomassa potata per pianta (cadenza biennale) è stata pari a 47,25 chilogrammi, con punte superiori a 70 kg. I livelli di produttività registrati sono stati pari a 2,36 t/ha per anno di sostanza fresca.

Per il nocciolo, il diametro e la lunghezza media dei polloni secondari risultavano pari, rispettivamente, a 16,84 mm e 104,08 cm. Dimensioni superiori sono state riscontrate nel materiale derivante dalla potatura invernale, con rami o polloni del diametro di 27,28 mm e lunghezza di 123,25 cm. La quantità media di biomassa potata per pianta è stata pari a 4,61 kg, con punte di oltre 6 kg. I livelli di produttività registrati sono stati pari a 1,52 t/ha per anno di sostanza fresca.

**Tabella 3** - Valori morfometrici delle piante e caratteristiche dimensionali del potato di olivo.

Parametri	Valori medi $\pm$ dev. st.	Valore minimo	Valore massimo
Altezza media piante (m)	4,25 $\pm$ 0,24	4	4,6
Diametro medio piante (cm)	46,62 $\pm$ 2,07	44	50
Altezza inserzione ramificazioni principali (m)	1,01 $\pm$ 0,11	0,9	1,15
Diametro inserzione rami potati (mm)	14,06 $\pm$ 5,96	7,09	36,83
Lunghezza rami potati (m)	1,27 $\pm$ 0,42	0,30	2
Biomassa media per pianta (kg)	47,25 $\pm$ 15,36	26	73
Biomassa media per ettaro (t/ha <sup>-1</sup> )	4,72	2,6	7,3
Biomassa media per ettaro all'anno (t/ha anno)	2,36	1,3	3,65



**Tabella 4** - Valori morfometrici delle piante e caratteristiche dimensionali del potato di nocciolo.

Parametri	Valori medi $\pm$ dev. st.	Valore minimo	Valore massimo
Altezza totale (m)	4,25 $\pm$ 0,52	2,95	5,3
Diametro basale del pollone principale (cm)	27,28 $\pm$ 9,48	15	62,71
Lunghezza rami/polloni principali (cm)	123,25 $\pm$ 28,77	67	187
Diametro polloni secondari (mm)	16,84 $\pm$ 5,35	7,9	35,5
Lunghezza polloni secondari (cm)	104,08 $\pm$ 30,57	59	177
Diametro di inserzione dei rami secondari (mm)	16,03 $\pm$ 7,23	6,67	32,27
Lunghezza rami secondari	51,51 $\pm$ 24,18	18	116
Biomassa media per pianta (kg)	4,61	3,6	6,2
Biomassa media per ettaro all'anni (t/ha anno)	1,52	1,19	2,05

#### *Residui derivanti dalla manutenzione del verde urbano*

Nell'ambito del recupero delle biomasse provenienti dalla manutenzione del verde urbano sono state individuate quattro specie particolarmente presenti tra le alberature stradali, parchi e giardini della Capitale: *Platanus occidentalis*, *Quercus ilex*, *Pinus domestica* ed *Eucalyptus camaldulensis*. Il materiale è stato fornito sotto forma di cippato dalla ditta Ecoflora 2, una delle principali società di recupero del verde pubblico presenti sul territorio di Roma. L'organizzazione aziendale prevede di suddividere le biomasse in entrata in tre differenti cumuli aventi caratteristiche qualitative differenti: residui di basso valore destinati al compostaggio, residui di ramaglie e cimali destinati alla produzione di cippato di medio valore, tronchi e rami di grandi dimensioni, spesso scortecciati, destinati alla fornitura di materiale cippato parzialmente disidratato e di elevato valore commerciale.

Per le finalità del progetto sono state impiegate le biomasse con caratteristiche qualitative migliori, utilizzando piante sramate e scortecciate.

---

## 6. IL PROCESSO PRODUTTIVO

---

*Andrea Acampora, Vincenzo Civitarese, Giulio Sperandio*

### 6.1 Disidratazione

La biomassa prima di poter essere pellettizzata deve subire, necessariamente, un processo di disidratazione al fine di ridurre il contenuto di umidità entro livelli ottimali per la successiva fase di addensamento del materiale. A tal fine è possibile procedere direttamente ad un pretrattamento termico tramite essiccazione artificiale (Allegato 1), oppure sottoporre la biomassa ad un processo di essiccazione naturale, tramite stoccaggio in campo. Quest'ultima strategia, se condotta nei modi e nei tempi opportuni può ridurre sensibilmente il contenuto di umidità iniziale riducendo, di conseguenza, i costi energetici necessari al raggiungimento dei livelli ottimali. Non disponendo di impianti per il trattamento termico della biomassa il materiale è stato sottoposto ad essiccazione naturale prevedendo un primo stoccaggio in campo del materiale intero e una successiva esposizione al sole del prodotto cippato e/o raffinato, avendo cura di proteggere lo stesso dalle precipitazioni. Tali operazioni hanno consentito il raggiungimento del contenuto di umidità finale idoneo alla successiva fase di pellettizzazione senza necessità di provvedere ad un trattamento termico. Di seguito viene documentata l'esperienza condotta su alcune tipologie di biomasse impiegate nel processo.

*Pioppo 3 e 6 anni: stoccaggio di 8 mesi del materiale non cippato, effetti sul contenuto di umidità e sul contenuto di sostanza secca*

Le piante di pioppo di 3 e 6 anni, suddivise in diverse frazioni (pianta intera, fusti, ramaglie e cimiali), sono state stoccate in un piazzale da metà novembre 2016 (tempo T0) a metà luglio 2017 (tempo T1), per un totale di 238 giorni (Foto 16). Al fine di non compromettere l'integrità strutturale dei campioni, andando ad influenzare il normale processo di disidratazione del materiale, il contenuto di umidità iniziale è stato valutato su piante di dimensioni simili abbattute nella medesima giornata. Il contenuto di umidità finale, invece, è stato valutato direttamente dopo le operazioni di cippatura delle piante stoccate.

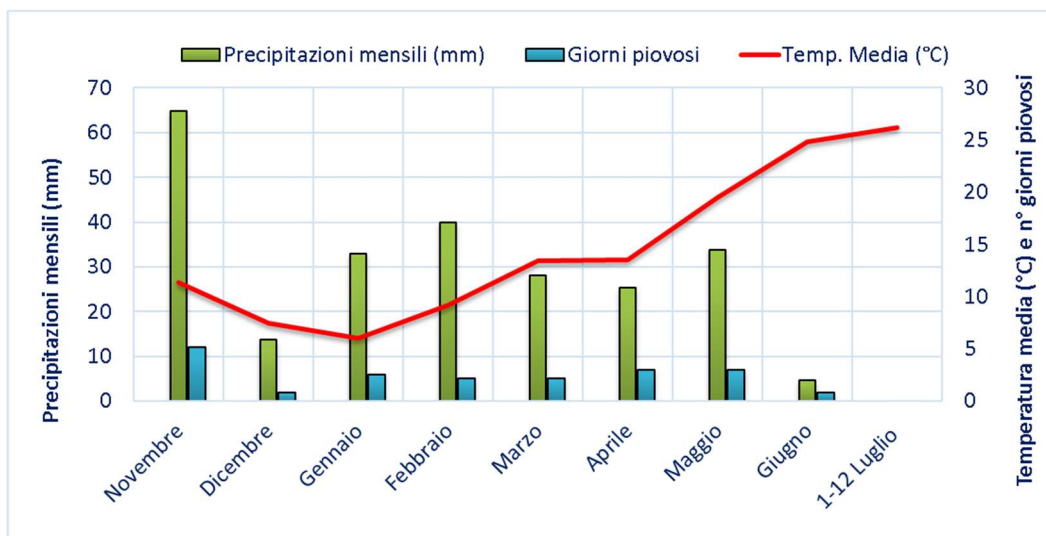
Durante il periodo di stoccaggio sono stati registrati 243 mm di pioggia caduti in 57 giorni. I mesi più piovosi sono risultati novembre, febbraio e maggio. L'andamento delle temperature medie evidenzia un trend decrescente da novembre a gennaio e costantemente crescente da gennaio a luglio. Nei mesi di giugno e luglio le precipitazioni sono risultate praticamente assenti, mentre le temperature medie sono risultate superiori ai 24,8°C (Figura 1), con massime che hanno raggiunto valori superiori a 36° C.

Al momento dell'abbattimento le piante si caratterizzavano per un contenuto medio di umidità del 52,42% per il pioppo di 3 anni e del 54,05% per quello di 6 anni. Valori del tutto simili sono stati riscontrati nelle ramaglie e nei cimali. Dopo 238 giorni di stoccaggio il contenuto medio di umidità si è ridotto sensibilmente, specie per le ramaglie e i cimali che hanno raggiunto i livelli di umidità più bassi, 6,58% e l'8,49% per il prodotto di 3 e 6 anni con tassi di disidratazione del 72,71% e 87,88%. Le piante di 3 anni hanno raggiunto un contenuto di umidità finale del 13,64%, quelle di 6 anni del 32,54%, con tassi di disidratazione rispettivi del 73,98% e del 39,80% (Tabella 5).

Il test F di Welch non ha rilevato l'esistenza di differenze statisticamente significative per quanto concerne il contenuto di umidità del prodotto fresco ( $p > 0,05$ ). Relativamente al prodotto disidratato, invece, si evidenziano differenze significative tra il pioppo di 3 e 6 anni e tra le differenti frazioni di riferimento (Figura 2).



**Foto 16** - Pioppo di 3 e 6 anni: piazzale di stoccaggio della biomassa suddivisa per anno e frazione



**Figura 1** - Principali parametri climatici registrati nel periodo di stoccaggio della biomassa

**Tabella 5** - Valori di umidità rilevati nei campionamenti per i diversi cicli colturali e frazione di prodotto.

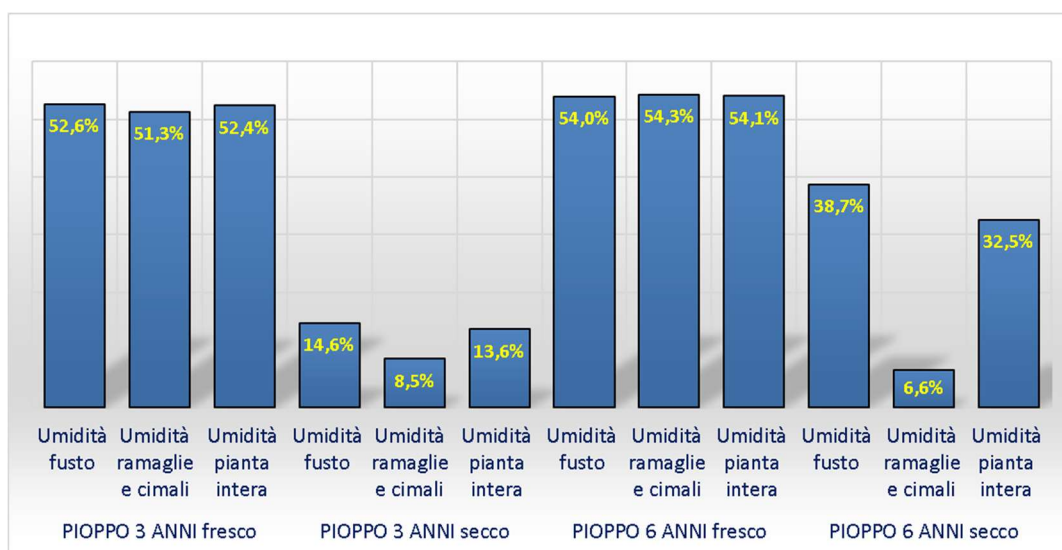
Materiale	Età	Contenuto % di umidità - Tempo T <sub>0</sub>	Contenuto % di umidità - Tempo T <sub>1</sub>	Riduzione % del contenuto di umidità
Pianta intera	3 anni	52,42±0,26	13,64±0,91	73,98
Fusto		52,63±0,60	14,65±1,07	72,17
Ramaglie e cimali		51,32±1,91	8,49±0,09	72,17
Pianta intera	6 anni	54,05±1,01	32,54±0,48	39,80
Fusto		54,00±1,19	38,72±0,49	28,29
Ramaglie e cimali		54,29±2,43	6,58±0,51	87,88

Al fine di raggiungere valori di umidità ottimali compresi tra il 10% e il 15%, il materiale con contenuto di umidità inferiore o uguale all'8% è stato sottoposto ad un ricondizionamento mentre il cippato proveniente dalle piante di 6 anni, che a fine stoccaggio si presentava con valori di poco superiori al 30%, è stato esposto quotidianamente al sole movimentandolo in maniera costante per una settimana.

Durante il periodo di stoccaggio è stato monitorato, parallelamente, anche il contenuto di sostanza secca della biomassa, in modo da poter evidenziare eventuali perdite di prodotto durante il periodo di permanenza in campo.

Come si evince dalla Tabella 6, le perdite di sostanza secca risultano pari a circa il 10% per le piante intere (8,94% per le piante di 3 anni, 10,09% per quelle di 6 anni), del 4,30% per le ramaglie e i cimali di 6 anni, del 29% per quelle di 3 anni. L'elevata perdita di sostanza secca valutata a carico di queste ultime potrebbe essere messa in relazione con la scarsa lignificazione della biomassa e le relative ridotte dimensioni del materiale di partenza, più esposto ai processi degradativi. Il *t*-test

non ha evidenziato, tuttavia, differenze statisticamente significative ( $p>0,05$ ) tra il contenuto medio di sostanza secca della biomassa, prima e dopo il periodo di stoccaggio.



**Figura 2** - Contenuto di umidità iniziale e finale della biomassa (media±dev. st.). Welch F test per materiale fresco:  $F=3,072$ ,  $df=10,91$ ,  $p>0,05$ . Welch F test per materiale disidratato:  $F=4719$ ,  $df=9,691$ ,  $p<0,01$ . Tuckey post hoc test: lettere differenti indicano differenze statisticamente significative ( $p<0,01$ )

**Tabella 6** - Contenuto idrico e sostanza secca media (± dev. st.) delle diverse parti di pianta in pioppi di 3 e 6 anni.

Parametro	Tempo	Pianta intera		Ramaglie e cimoli	
		3 anni	6 anni	3 anni	6 anni
Peso (kg)	T <sub>0</sub>	17,38±4,30	80,4±33,31	3,72±1,39	15,05±3,75
	T <sub>1</sub>	8,66±1,86	49,50±21,26	1,30±0,64	7,05±1,79
Umidità (%)	T <sub>0</sub>	52,42±0,26	54,05±1,01	51,32±1,91	54,29±2,43
	T <sub>1</sub>	13,64±0,91	32,54±0,48	8,49±0,09	6,58±0,51
Sostanza secca (kg)	T <sub>0</sub>	8,27±2,04	36,94±15,31	1,64±0,69	6,88±1,72
	T <sub>1</sub>	7,48±1,61	33,39±14,34	1,19±0,58	6,59±1,67
Variazione S.S. (%)		-8,94±3,94	-10,09±2,39	-29,10±5,70	-4,29±3,09

### Pioppo 9 anni e residui forestali - stoccaggio 5 mesi del materiale intero e sminuzzato

Il materiale, suddiviso per tipologia e frazione considerata (forestale, SRF, pianta intera, fusti, ramaglie e cimoli), è stato stoccato in un piazzale dal 20 febbraio 2018 (tempo T<sub>0</sub>) al 20 aprile 2018 (tempo T<sub>1</sub>), per un totale di 59 giorni (Foto 17). Durante tale periodo sono stati rilevati, tramite centralina meteorologica aziendale, i principali dati meteorologici (precipitazioni mensile, giorni di pioggia, temperature medie mensili).

La biomassa è stata quindi cippata, raffinata e posizionata sotto tettoia all'interno di nove differenti bins. Il processo di disidratazione del materiale ridotto è stato favorito esponendolo periodicamente al sole fino al 31 maggio 2018 (tempo T2) (Foto 18).

Il contenuto di umidità della biomassa è stato monitorato durante tutto il periodo di riferimento rilevandone i parametri nei 3 intervalli temporali sopra citati (T0, T1, T2).

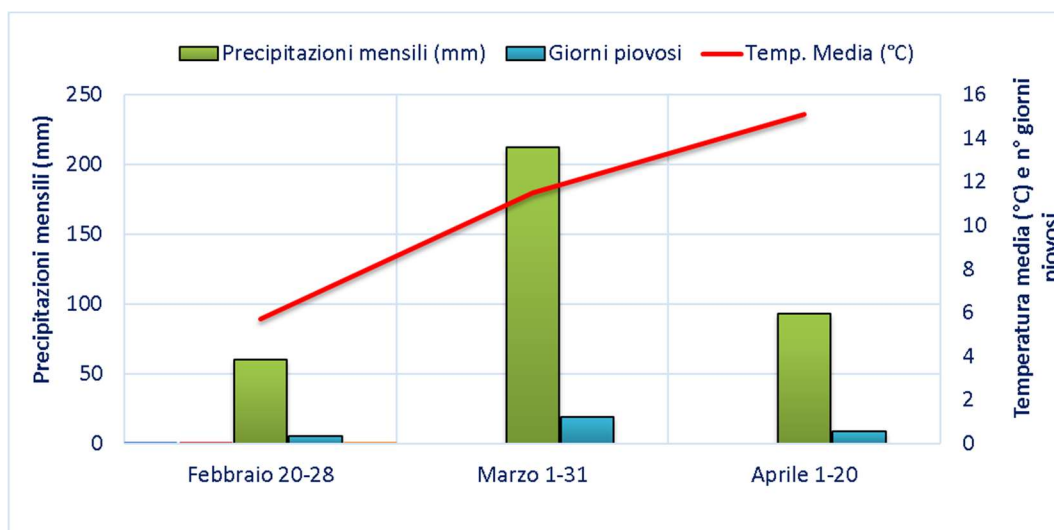


*Foto 17 - Piazzale di stoccaggio del pioppo di 9 anni*



*Foto 18 - Esposizione al sole del materiale raffinato.*

Durante il periodo di stoccaggio sono stati registrati 345 mm di pioggia e 40 mm di neve caduti in 35 giorni: 60 mm dal 20 al 28 febbraio, 212 mm nel mese di marzo e 93 mm dal 1 al 17 aprile. L'andamento delle temperature medie evidenzia una tendenza crescente durante i tre mesi di monitoraggio: 5,72, 11,48 e 15,1° C rispettivamente nell'ultima settimana di febbraio, nel mese di marzo e nelle prime due decadi di aprile, con valori massimi di 27° C raggiunti a metà aprile (Figura 3). Al momento dell'abbattimento le piante si caratterizzavano per un contenuto medio di umidità del 54,74% (T0) raggiungendo, dopo 2 mesi di stoccaggio, un valore medio del 48,96% (T1). Nel periodo successivo la biomassa raffinata è stata conservata sotto tettoia ed esposta periodicamente al sole e ciò ha favorito una considerevole riduzione del tenore idrico della biomassa da pellettizzare, attestatosi su valori medi di poco superiori al 11% (T2) (Tabella 7).



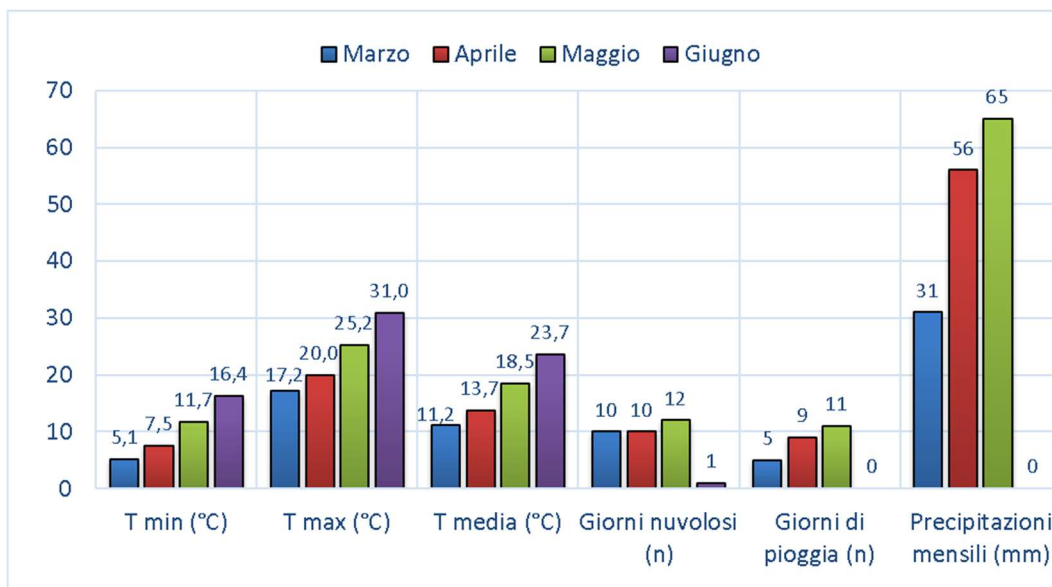
**Figura 3** - Principali parametri climatici registrati nel periodo di stoccaggio della biomassa

**Tabella 7** - Contenuto di umidità della biomassa nei 3 periodi di riferimento.

Tipologia di biomassa	Materiale intero T <sub>0</sub> (20 febbraio)	Cippato - T <sub>1</sub> (20 aprile)	Raffinato - T <sub>2</sub> (31 maggio)
Eucalitto	54,13%±0,60	47,03%±2,94	12,79%±0,55
Pino radiata	52,50% ± 3,13	47,76% ± 2,31	12,09% ± 0,26
Pino edarica	55,07% ± 0,75	47,55% ± 3,15	12,72% ± 0,65
Pioppo 9 anni ramaglie e cimali	53,48% ± 0,79	52,69% ± 0,89	10,15% ± 0,56
Pioppo 9 anni pianta intera	56,27% ± 1,81	47,95% ± 3,93	9,32% ± 0,63
Pioppo 9 anni fusto	56,85% ± 2,09	50,78% ± 4,53	10,40% ± 0,39
Media	54,72%	48,96%	11,25%

### *Residui agricoli: potature di nocciolo e ulivo*

In Figura 4 sono riportati i dati meteo rilevati per il quadrimestre in esame (marzo-giugno 2017). Nei quattro mesi presi in considerazione ad esclusione del mese di giugno, durante il quale non sono state registrate precipitazioni piovose, sono caduti, mediamente, 51 mm di pioggia che hanno avuto una evidente ripercussione sull'umidità del materiale legnoso potato e lasciato a terra. L'andamento delle temperature, invece, ha evidenziato un naturale aumento stagionale.



**Figura 4** - Parametri meteorologici registrati durante il quadrimestre Marzo – Giugno 2017

I residui di potatura del nocciolo erano caratterizzati, alla raccolta effettuata verso la fine di marzo, da un contenuto di umidità pari a circa il 46,15%, sicuramente influenzato dalle abbondanti precipitazioni avvenute nella zona in esame pochi giorni prima della raccolta dei residui legnosi. Dopo circa un mese i residui sono stati raffinati e poi esposti per 48 ore al sole. Il contenuto di umidità rilevato sul materiale legnoso raffinato, dopo questo procedimento, era pari all'11%.

Nel caso dell'olivo, i residui di potatura presentavano un'umidità del 27% alla raccolta (fine aprile). Dopo circa 20 giorni è stata effettuata la raffinazione e l'esposizione del materiale al sole per 48 ore. Il contenuto di umidità finale era pari all'11,45%.

## 6.2 Cippatura, raffinazione e perdite di prodotto durante il processamento

Tutte le tipologie di biomassa sono state sottoposte ad un processo di sminuzzatura finalizzato al raggiungimento delle dimensioni idonee a garantire la successiva fase di pellettizzazione. Dopo una cippatura preliminare, eseguita impiegando una cippatrice forestale a disco Farmi Forest CH260 (Foto 19) equipaggiata con griglia da 60 mm, è stato effettuato un doppio passaggio nel raffinatori BL-100 (Foto 20) utilizzando una griglia da 36 mm e successivamente una da 6 mm. Il materiale proveniente dal verde urbano, invece, è stato sottoposto solo a raffinazione essendo stato fornito già sotto forma di cippato. Le Foto da 21 a 28 evidenziano, per ciascuna



tipologia di biomassa e frazione considerata, le differenti dimensioni e qualità del materiale ottenuto nelle diverse fasi del processo di riduzione della pezzatura.



**Foto 19** - Cippatura biomassa dopo periodo di stoccaggio con cippatrice forestale a disco Farmi Forest CH260.



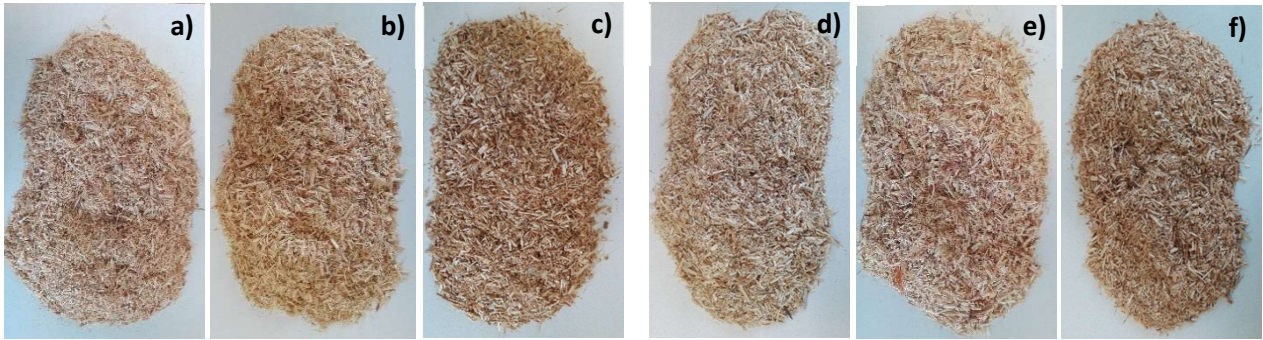
**Foto 20** - Raffinazione del cippato con biotrituratore BL-1000.



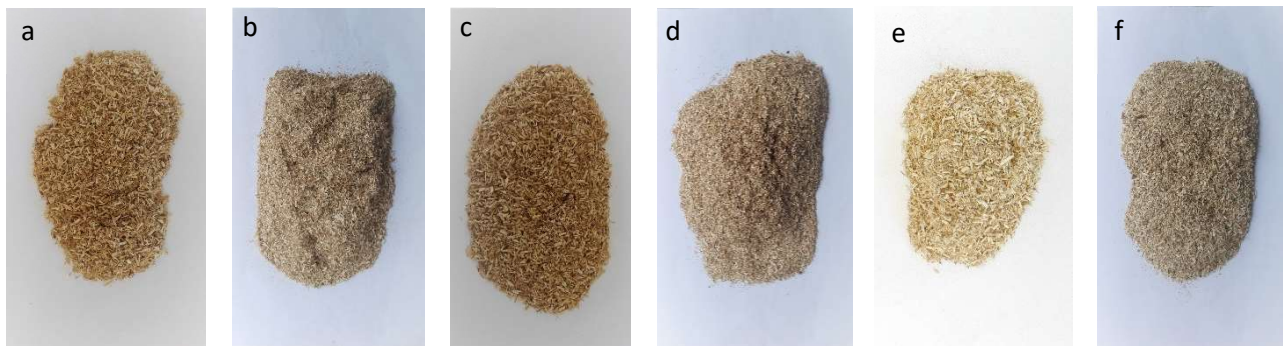
**Foto 21** - Cippato di pioppo di 3 anni ottenuto con cippatrice forestale a disco Farmi Forest CH260. A colorazioni più chiare corrispondono prodotti con contenuto di corteccia e ramaglia inferiore [a) solo fusto, b) fusto e rami, c) solo rami].



**Foto 22** - Cippato di pioppo di 6 anni ottenuto con cippatrice forestale a disco Farmi Forest CH260: a) solo fusto, b) fusto e rami.



**Foto 23** - Prodotto ottenuto dopo la raffinazione del cippato di pioppo di 3 e 6 anni: a) solo fusto di 3 anni, b) pianta intera di 3 anni, c) ramaglie e cimali di 3 anni, d) solo fusto di 6 anni, e) pianta intera di 6 anni, f) ramaglie e cimali di 6 anni



**Foto 24** - Prodotto ottenuto dopo la raffinazione del cippato di pioppo di 9 anni: a) pianta intera raffinazione a 6 mm, b) pianta intera raffinazione a 4 mm, c) fusto raffinazione a 6 mm, d) fusto raffinazione a 4 mm, ramaglie e cimali raffinazione a 6 mm, f) ramaglie e cimali raffinazione a 4 mm



**Foto 25** - Materiale legnoso proveniente da potature di nocciolo raffinato (griglia da 40 mm e 6 mm rispettivamente)



**Foto 26** – Cippato di leccio, pino, platano ed eucalipto, rispettivamente



**Foto 27** - Raffinato con griglia da 36 mm di leccio, pino, platano ed eucalipto, rispettivamente



**Foto 28** – Raffinato con griglia da 6 mm di leccio, pino, platano ed eucalipto, rispettivamente

Le fasi di cippatura e raffinazione comportano perdite di prodotto durante il processamento, a partire dalla fase di alimentazione fino allo scarico del materiale lavorato. Al fine di quantificare tali perdite, una quota parte della biomassa proveniente dal pioppo di 3 e 6 anni interessata nella sperimentazione è stata pesata prima e dopo l'ingresso nelle due macchine (cippatrice e raffinatore) (Tabella 8). Le perdite risultano comprese tra il 2,90 e il 3,07%, per quanto concerne la cippatura e il 6,79 e tra il 7,34% per la raffinazione. È doveroso sottolineare, tuttavia, che equipaggiando il biotrituratore impiegato nella raffinazione con un adeguato sistema di aspirazione e scarico i valori rilevati risulterebbero sensibilmente inferiori.

**Tabella 8** - Perdite di processo e quadro riepilogativo dei quantitativi in entrata e in uscita dai dispositivi di cippatura e raffinazione.

Operazione	Prodotto	Biomassa in entrata (kg)	Biomassa in uscita (kg)	Perdite di processo (%)
Cippatura	Materiale di 3 anni	97,68	94,85	2,90
	Materiale di 6 anni	121,88	118,14	3,07
Raffinazione	Materiale di 3 anni	94,85	87,89	7,34
	Materiale di 6 anni	118,14	110,12	6,79

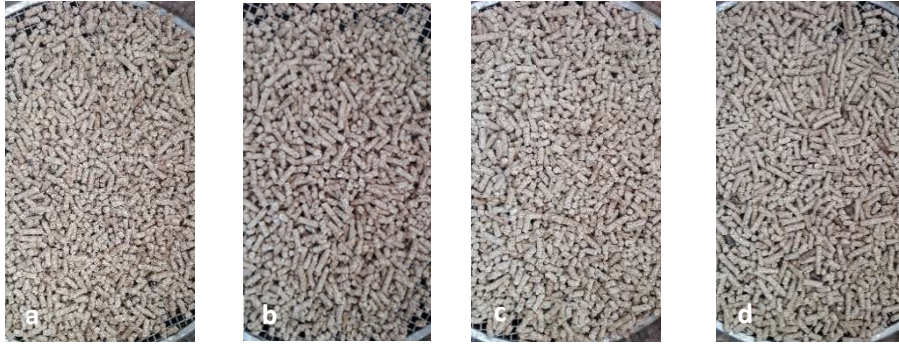
### 6.3 Pellettizzazione

La sperimentazione ha interessato 16 differenti tipologie di biomassa impiegando 9 specie diverse tra conifere e latifoglie (Tabella 9).

Per quanto concerne il pioppo SRF di 3, 6 e 9 anni, sono state effettuate prove di pellettizzazione di differenti frazioni, impiegando i fusti sramati, le piante intere, solo ramaglie e cimali. Relativamente a quest'ultima tipologia di materiale è stato possibile produrre pellet solo per il pioppo di 9 anni. Il materiale di 3 e 6 anni, invece, non ha subito un processo di aggregazione idoneo e ciò potrebbe essere riconducibile alle ridotte dimensioni dei rami e dei cimali e alla loro relativa scarsa lignificazione nei primi 5 – 6 anni di età.

**Tabella 9** - Tipologie di biomasse sottoposte a pellettizzazione.

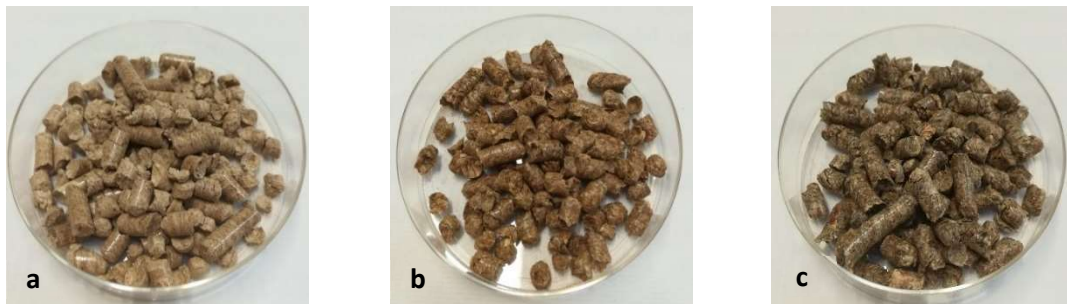
	Specie	Età piante	Frazione	Foto n°
Piantagioni dedicate	Pioppo	3 anni	pianta intera	29a
	Pioppo	3 anni	fusto	29b
	Pioppo	6 anni	pianta intera	29c
	Pioppo	6 anni	fusto	29d
	Pioppo	9 anni	pianta intera	30a
	Pioppo	9 anni	fusto	30b
	Pioppo	9 anni	ramaglie e cimali	30c
Residui forestali	Eucalipto	18 anni	fusto	31a
	Pino radiata	18 anni	fusto	31b
	Pino eldarica	18 anni	fusto	31c
Residui agricoli	Nocciolo	30 anni	Polloni/rami	32a,b
	Ulivo	100 anni	Rami	32b,c
Verde urbano	Platano	nd	fusto	33a
	Eucalipto	nd	fusto	33b
	Pino domestico	nd	fusto	33c
	Leccio	nd	fusto	33d



**Foto 29** - Pellet ottenuto da SRF di pioppo: 3 anni pianta intera (a), 3 anni solo fusto (b), 6 anni pianta intera (c), 6 anni solo fusto (d)



**Foto 30** - Pellet ottenuto da SRF di pioppo: 9 anni pianta intera (a), 9 anni solo fusto (b), 9 anni ramaglie e cimoli (c)



**Foto 31** - Pellet ottenuto da residui forestali: Eucalipto di 18 anni (a), pino radiata di 18 anni (b), Pino eldarica di 18 anni (c)



**Foto 32** - Pellet ottenuto da potature di nocciolo biologico (a, b) e ulivo (c, d)



**Foto 33** - Pellet ottenuto dalla manutenzione del verde urbano: platano (a), eucalipto (b), pino domestico (c), leccio (d)

#### 6.4 Effetti dei processi di raffinazione e densificazione sul contenuto di umidità finale della biomassa trattata

In questo paragrafo vengono esaminate le variazioni di umidità della biomassa trattata durante le operazioni di raffinazione e pellettizzazione. Lo scopo è quello di fornire indicazioni sulla corretta gestione delle varie fasi del processo, tenendo conto che i sistemi che comportano il riscaldamento della biomassa (per compressione o attrito) e/o che prevedono la ventilazione forzata della stessa (espulsione del prodotto dal raffinatore o raffreddamento del pellet), possono portare a riduzioni eccessive del contenuto di umidità finale, con ripercussioni negative in fase di densificazione o conservazione del prodotto.

Per quanto concerne la raffinazione, sono stati eseguiti dei test utilizzando la biomassa cippata proveniente dal verde urbano. Il contenuto di umidità iniziale era compreso tra il 31,5 e il 35,9% raggiungendo, dopo il passaggio nel raffinatore, valori tra il 25,2 e il 29,8% con perdite percentuali tra il 14,6% e il 29,7% (Tabella 10).

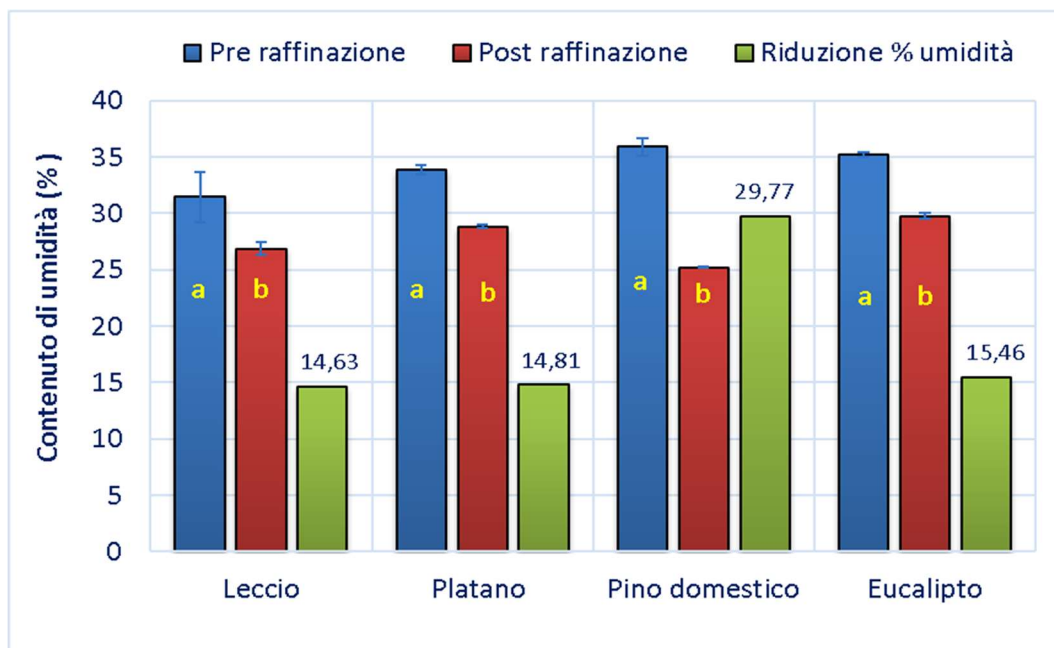
**Tabella 10** - Valori medi e deviazioni standard riferiti al contenuto di umidità della biomassa prima e dopo la raffinazione.

Specie	Prodotto	Valori rilevati			Media $\pm$ Dev. St.
Leccio	Cippato	28,89	32,59	32,89	31,46 $\pm$ 2,23
Platano		33,60	34,31	33,72	33,88 $\pm$ 0,38
Pino domestico		35,74	36,73	35,24	35,91 $\pm$ 0,75
Eucalipto		34,98	35,33	35,35	35,22 $\pm$ 0,21
Leccio	Raffinato 6 mm	27,51	26,40	26,65	26,86 $\pm$ 0,58
Platano		28,67	28,91	28,99	28,86 $\pm$ 0,17
Pino domestico		25,20	25,27	25,20	25,22 $\pm$ 0,04
Eucalipto		29,83	29,97	29,53	29,78 $\pm$ 0,22

Gli attriti generati dai coltelli in fase di taglio e il getto d'aria prodotto dal sistema di espulsione producono, infatti, un innalzamento e un abbassamento della temperatura del materiale stesso, con conseguenti perdite di umidità. Il *t* test ha rilevato l'esistenza di differenze statisticamente significative per tutte le specie oggetto di indagine ( $p < 0,001$ ) (Figura 5).

Per la perdita di umidità ascrivibile alla sola fase di pellettizzazione si è fatto riferimento al materiale proveniente dai residui forestali, dal pioppo SRF di 9 anni e dai residui di nocciolo e ulivo.

La biomassa, durante il passaggio nel sistema rulli trafila, viene sottoposta a forti pressioni con un sensibile aumento della temperatura. Ciò favorisce da un lato la coesione delle particelle dovuta alla parziale fusione della lignina, dall'altro una ulteriore riduzione del contenuto di umidità del materiale trasformato. La biomassa raffinata si attestava su valori medi di umidità di poco superiori al 11% mentre dopo il passaggio nel sistema rulli-trafila sono state registrate riduzioni tra il 7,46% e il 18,53%, con differenze significative (*t*-test) per ciascuna tipologia di biomassa, ad eccezione delle ramaglie e cimali di pioppo di 9 anni (Tabella 11).



**Figura 5** - Contenuto di umidità della biomassa prima e dopo il processo di raffinazione. T-test: lettere differenti indicano differenze statisticamente significative tra le coppie di valori

Risultati analoghi sono stati ottenuti con il nocciolo e ulivo. Come mostrato in Tabella 12, la pellettizzazione ha prodotto una riduzione del contenuto di umidità di circa il 21% nel caso del nocciolo (umidità finale 8,68%) e del 26,6% nel caso dell'ulivo (umidità finale 8,41%). Il test non parametrico di Kruskal Wallis ha rivelato l'esistenza di differenze statisticamente significative nel materiale prima e dopo il passaggio nella pellettatrice in entrambe le tipologie di biomassa ( $p < 0,05$ ). Differenze significative emergono anche nel contenuto di umidità dei due pellet prodotti ( $p < 0,05$ ).

**Tabella 11** - Contenuto di umidità della biomassa nei 2 periodi di riferimento e perdita di umidità durante la pellettizzazione. T test colonne T2 e T3. Gli asterischi indicano differenti livelli di significatività statistica:  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*),  $p < 0,001$  (\*\*\*). I valori percentuali sono stati trasformati preventivamente in radice quadrata dell'arcoseno. I valori riportati nella colonna  $\Delta$  T3/T2 si riferiscono ai valori medi.

Tipologia di biomassa	Raffinato	Pellet	$\Delta$
Eucalipto	12,79%±0,55	11,02%±0,18	-13,76%±3,05**
Pino radiata	12,09% ± 0,26	10,43% ± 0,39	-13,70% ± 2,83**
Pino eldarica	12,72% ± 0,65	10,54% ± 0,25	-17,03% ± 3,45**
Pioppo 9 anni ramaglie e cimali	10,15% ± 0,56	9,37% ± 0,42	-7,46% ± 6,56
Pioppo 9 anni pianta intera	9,32% ± 0,63	8,35% ± 0,31	-10,24% ± 4,54*
Pioppo 9 anni fusto	10,40% ± 0,39	8,47% ± 0,37	-18,53% ± 4,94***
Media	11,25%	9,70%	-13,48%



**Tabella 12** - Umidità del materiale raffinato e pellettizzato. Test di Kruskal-Wallis and Mann-Whitney pairwise comparisons. Lettere differenti indicano differenze statisticamente significative ad un livello  $p < 0.05$ .

	Nocciolo		Olivo	
	raffinato	pellet	raffinato	pellet
Media	11,00 <sup>a</sup>	8,68 <sup>b</sup>	11,45 <sup>a</sup>	8,41 <sup>c</sup>
Dev St	0,49	0,16	0,31	0,12

---

## 7. ANALISI QUALITATIVA DEL PELLET PRODOTTO

---

*Vincenzo Civitarese, Andrea Acampora, Giulio Sperandio,  
Francesco Gallucci, Beatrice Vincenti, Monica Carnevale*

La qualità dei biocombustibili solidi viene stabilita da norme tecniche internazionali che definiscono, pur non obbligandone l'osservanza, le caratteristiche di un determinato prodotto, processo o servizio. La certificazione riveste un ruolo di primaria importanza per garantire il rispetto dei parametri qualitativi del prodotto da immettere nel mercato e consente al consumatore di scegliere un prodotto efficiente. L'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI) rappresenta il nostro paese nell'attività normativa internazionale mentre le EN sono norme elaborate dal Comitato Europeo di Normazione (CEN), il cui recepimento è obbligatorio per i paesi membri. Le ISO, infine, sono norme elaborate dall'organizzazione Internazionale per la standardizzazione, il cui recepimento non è obbligatorio.

L'attuale complesso normativo per prodotti energetici fa capo alla UNI EN ISO 17225:2014 che sostituisce, di fatto, il vecchio pacchetto di norme del 2011 (UNI EN 14961). Per quanto concerne il pellet occorre far riferimento alla UNI EN ISO 17225-2: Definizione delle classi di pellet di legno [33], dove vengono indicate le relative metodiche da seguire per il rilievo dei differenti parametri (Tabella 13). La caratterizzazione dei campioni è stata effettuata presso il Laboratorio per le attività sperimentali sull'energia rinnovabile da biomassa (LAS-ER-B) del CREA-IT, andando a valutare i seguenti parametri: contenuto di umidità, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri, potere calorifico, contenuto in metalli pesanti, massa volumica apparente, diametro e lunghezza del materiale, durabilità meccanica. Per ciascuna tipologia di biomassa i parametri sopra citati sono stati rilevati su 5 campioni, ad eccezione delle analisi dimensionali (lunghezza e diametro) che hanno richiesto 50 campioni ciascuno. Il contenuto di umidità è stato misurato secondo la norma UNI EN ISO 18134-1: 2015 [34], utilizzando un forno di essiccazione Memmert UFP800. Il campione di biomassa è stato essiccato a  $103 \pm 2$  °C fino al raggiungimento di un peso costante.

Il contenuto in ceneri è stato misurato secondo la norma UNI EN ISO 18122: 2016 [35] utilizzando un forno a muffola Lenton EF11 / 8B. Campioni di circa 1 g sono stati posti in crogiuoli di porcellana inseriti all'interno del forno a muffola. La determinazione del contenuto di ceneri è stata

calcolata considerando la perdita di peso del campione prima e dopo il processo di riscaldamento, avvenuto in un primo momento fino a 250 °C per un'ora e successivamente fino a 550 °C per 2 ore.

Per la fusibilità delle ceneri è stato impiegato un analizzatore SYLAB SHV-IF 1500, secondo quanto previsto dalla normativa UNI CEN/TS 15370-1 [36]. Per lo svolgimento dell'analisi sono stati preparati campioni di forma cilindrica da sottoporre a temperature fino a 1550 °C, valutandone la deformazione mediante analisi di immagine. Convenzionalmente si considera il valore della fusibilità delle ceneri quello corrispondente all'inizio della deformazione del campione.

Il potere calorifico superiore è stato determinato secondo la UNI EN ISO 18125: 2018 [37], utilizzando un calorimetro Anton Parr 6400 mentre il potere calorifico inferiore è stato calcolato applicando un logaritmo previsto dalla stessa norma. Il contenuto totale di carbonio (C), idrogeno (H) e azoto (N) è stato misurato secondo la norma UNI EN ISO 16948: 2015 [38] utilizzando un analizzatore elementare CHNS-O Costech ECS 4010 mentre per il contenuto in zolfo si è fatto riferimento alla EN ISO 16994:2016 [39].

**Tabella 13** - Parametri qualitativi delle classi di pellet per uso residenziale/commerciale (UNI EN 17225-2:2014).

Parametro	U.M.	Classe A1	Classe A2	Classe B
Diametro (D)	mm	6 (+1) o 8 (+1)		
Lunghezza (L)	mm	3,15 < L < 40		
Contenuto idrico (M)	%	≤ 10		
Ceneri	%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Durabilità meccanica	%	≥ 98	≥ 97,5	
Particelle fini (< 3,15 mm)	%	≤ 1,0 (prodotto sfuso); ≤ 0,5 (prodotto in sacchi)		
Additivi	%	≤ 2%		
PCI	MJ/kg	≥ 16,5		
Densità apparente	kg/m <sup>3</sup>	BD ≥ 600		
Azoto (N)	%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Zolfo (S)	%	≤ 0,04	< 0,05	
Cloro (Cl)	%	≤ 0,02		≤ 0,03
Arsenico (As)	mg/kg	< 1		
Cadmio (Cd)	mg/kg	≤ 0,5		
Cromo (Cr)	mg/kg	≤ 10		
Rame (Cu)	mg/kg	≤ 10		
Piombo (Pb)	mg/kg	≤ 10		
Mercurio (Hg)	mg/kg	≤ 0,1		
Nickel (Ni)	mg/kg	≤ 10		
Zinco (Zn)	mg/kg	≤ 100		
Punto di fusione ceneri	°C	≥ 1200	≥ 1100	

La determinazione degli elementi è stata eseguita mediante ICP-MS 7700 Agilent secondo quanto previsto dalla UNI EN ISO 16968:2015 [40]. Un'aliquota di ogni campione (circa 500 mg) è stata trasferita in appositi contenitori di teflon e sottoposta ad attacco acido ( $\text{HNO}_3$  e di  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) mediante un digestore a microonde (Start D, Milestone). Sono state inoltre definite la massa volumica apparente [41] (UNI EN ISO 17828), il diametro e la lunghezza del materiale [42] (UNI EN ISO 17829), la durabilità meccanica [43] (EN ISO 17831-1:2015). La Tabella 13 mostra il quadro riepilogativo dei valori limite di ciascun parametro in funzione della classe qualitativa di appartenenza.

### **7.1 Pellet di pioppo SRF di 3, 6 e 9 anni**

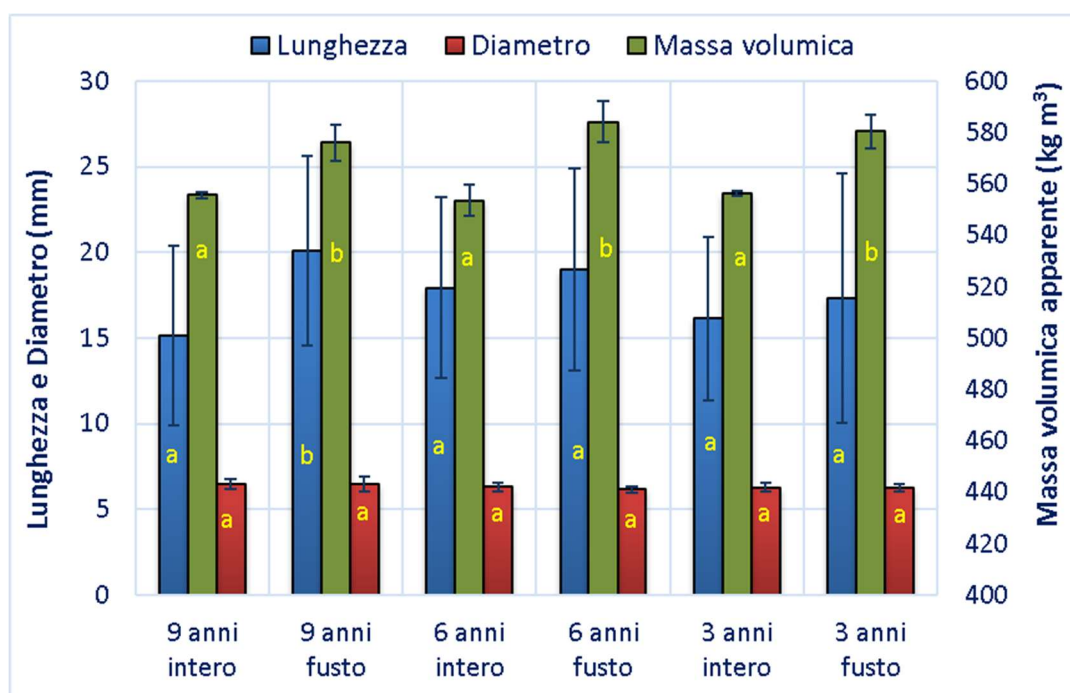
#### *Diametro, lunghezza, massa volumica apparente, durabilità*

Il diametro medio dei cilindretti risultava di poco superiore a 6 mm, con una lunghezza compresa tra 15,13 e 17,93 mm per il materiale intero e 17,35 e 20,08 mm per il materiale senza rami. La densità apparente variava tra 576 e 584  $\text{kg/m}^3$  per gli alberi sramati e 553 e 556  $\text{kg/m}^3$  per gli alberi interi. I valori di durabilità meccanica risultavano compresi tra il 97,1% per il pioppo di 9 anni senza rami e il 98,6% per il pioppo intero di 6 anni. L'utilizzo dei soli fusti sembrerebbe ripercuotersi positivamente su alcuni dei parametri esaminati, con un incremento medio dei valori relativi alla lunghezza e alla massa volumica apparente del materiale. I dati sopra esposti e le relative analisi statistiche sono riportati in Figura 6.

#### *Potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri*

Il potere calorifico inferiore variava tra 17,55 e 17,85 MJ/kg mentre per il contenuto in ceneri si evidenziavano valori inferiori all'1,90% per i fusti di 9 anni e per il materiale di 6 anni, con e senza rami, valori compresi tra 2,27% e 2,78% per le piante intere di 9 e 3 anni.

Il punto di fusione delle ceneri, infine, risultava sempre superiore a 1400 °C. In Tabella 14 vengono riportati i dati sopra esposti e le relative analisi statistiche.



**Figura 6** - Principali parametri fisici del pellet rilevati in funzione dell'età delle piante e della frazione considerata. One-way ANOVA per lunghezza Df: 144, MS: 32.7052, F: 2,51,  $p < 0,05$ ; Welch F test per massa volumica apparente:  $F = 26.12$ ,  $df = 10.47$ ,  $p < 0,001$ . Tuckey post hoc test: lettere differenti indicano differenze statisticamente significative ( $p < 0,05$ ).

**Tabella 14** - Potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri di differenti tipi di biomasse pellettizzate. PCI: Kruskal Wallis,  $H = 3,134$ ,  $H_c = 3,136$ ,  $p > 0,05$ ; Contenuto in ceneri: Welch F test e Tuckey post hoc test,  $F = 94,56$ ,  $df = 10,77$ ,  $p < 0,001$ ; Fusibilità ceneri: Welch F test e Tuckey post hoc test,  $F = 189,8$ ,  $df = 9,981$ ,  $p < 0,001$ . Lettere differenti indicano differenze statisticamente significative ( $p < 0,05$ ).

Biomassa pellettizzata	Potere calorifico inferiore (MJ kg <sup>-1</sup> )	Contenuto in ceneri (%)	Fusibilità ceneri (°C)
Pianta intera 3 anni	17,67±0,27 <sup>a</sup>	2,78±0,09 <sup>a</sup>	1433,4 ±4,4 <sup>c</sup>
Fusto 3 anni	17,85±0,38 <sup>a</sup>	2,71±0,31 <sup>a</sup>	1455,8 ±5,8 <sup>d</sup>
Pianta intera 6 anni	17,85±0,11 <sup>a</sup>	1,82 ±0,23 <sup>c</sup>	1404,6 ±17,2 <sup>c</sup>
Fusto 6 anni	17,68 ±0,26 <sup>a</sup>	1,89±0,08 <sup>c</sup>	1433,2 ±4,3 <sup>c</sup>
Pianta intera 9 anni	17,72 ±0,28 <sup>a</sup>	2,27±0,06 <sup>b</sup>	1479,8±1,1 <sup>a</sup>
Fusto 9 anni	17,55±0,62 <sup>a</sup>	1,87±0,04 <sup>c</sup>	1457,6±4,6 <sup>b</sup>

### Metalli pesanti, zolfo, azoto

In Tabella 15 viene proposto il quadro riepilogativo del contenuto in metalli pesanti rilevati per le diverse tipologie di biomassa pellettizzata e la relativa analisi statistica. Come è possibile notare, la più alta concentrazione in metalli pesanti è stata riscontrata nel pioppo di 9 anni (As, Cr, Pb, Ni e Zn). As, Ni e Cr sono risultati presenti in concentrazioni più basse nel pioppo di 6 anni senza

rami, Pb e Cu nel pioppo di 6 anni con rami, Zn nel pioppo di 3 anni senza rami, Cd nel pioppo di 9 anni senza rami. Altri parametri esaminati (non riportati in Tabella) sono la concentrazione di zolfo (S), pari allo 0,0% e di azoto (N), tra 0,04% e 0,26%.

**Tabella 15** - Metalli pesanti rilevati nei diversi tipi di pellet prodotti. As: One-Way Anova,  $F = 11,07$ ,  $df = 24$ ,  $p < 0,001$ . Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn: Kruskal-Wallis e Mann-Whitney,  $H = 26,03, 27,05, 27,85, 28,23, 28,23, 25,39$  rispettivamente,  $H_c = 26,18, 27,58, 27,92, 28,39, 28,33, 25,94$  rispettivamente,  $p < 0,001$ .

Biomassa pellettizzata	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Pianta intera 3 anni	0,0050 <sup>bc</sup> ±0,0007	0,2282 <sup>a</sup> ±0,0011	0,1562 <sup>b</sup> ±0,0015	0,9330 <sup>c</sup> ±0,0071	0,0352 <sup>e</sup> ±0,0004	0,2406 <sup>c</sup> ±0,0009	12,1950 <sup>c</sup> ±0,1897
Fusto 3 anni	0,0056 <sup>ac</sup> ±0,0009	0,2318 <sup>a</sup> ±0,0056	0,1440 <sup>c</sup> ±0,0007	0,8874 <sup>e</sup> ±0,0017	0,0464 <sup>c</sup> ±0,0009	0,2222 <sup>d</sup> ±0,0019	11,4421 <sup>d</sup> ±0,2845
Pianta intera 6 anni	0,0046 <sup>bc</sup> ±0,0009	0,1946 <sup>cd</sup> ±0,0082	0,1558 <sup>b</sup> ±0,0024	0,8306 <sup>f</sup> ±0,0138	0,0320 <sup>f</sup> ±0,0012	0,2022 <sup>e</sup> ±0,0013	12,5868 <sup>c</sup> ±0,2566
Fusto 6 anni	0,0028 <sup>d</sup> ±0,0011	0,1966 <sup>c</sup> ±0,0018	0,1058 <sup>e</sup> ±0,0043	0,9950 <sup>a</sup> ±0,0007	0,0418 <sup>d</sup> ±0,0013	0,1742 <sup>f</sup> ±0,0011	12,3915 <sup>c</sup> ±0,2021
Pianta intera 9 anni	0,0068 <sup>a</sup> ±0,0011	0,2028 <sup>b</sup> ±0,0011	0,2462 <sup>a</sup> ±0,0055	0,9470 <sup>b</sup> ±0,0102	0,0756 <sup>a</sup> ±0,0005	1,6852 <sup>a</sup> ±0,0018	14,4502 <sup>a</sup> ±0,1057
Fusto 9 anni	0,0044 <sup>bcd</sup> ±0,0005	0,1878 <sup>d</sup> ±0,0018	0,1308 <sup>d</sup> ±0,0029	0,9078 <sup>d</sup> ±0,0100	0,0678 <sup>b</sup> ±0,0011	0,3354 <sup>b</sup> ±0,0009	14,3222 <sup>b</sup> ±0,1020

### Discussioni

Il pellet ottenuto dai fusti sramati si caratterizzava per una maggiore densità apparente (tra +3,6% e +5,5%) e per una maggiore lunghezza media (tra +5% e +32%) rispetto a quello prodotto impiegando piante intere. L'allungamento del ciclo, invece, sembrerebbe non influenzare i valori riferibili a questi due parametri. Il potere calorifico inferiore risultava in linea con quanto riportato in letteratura [44].

Analizzando la Tabella 16 possiamo identificare quali parametri vengono rispettati dal pellet di pioppo, in riferimento alla EN ISO 17225-2.

Tutti i prodotti soddisfano i requisiti per diametro, lunghezza, contenuto di umidità, punto di fusione delle ceneri, potere calorifico inferiore, N, S e metalli pesanti. I tre parametri più critici risultano essere il contenuto in ceneri, la massa volumica apparente e la durabilità.

Un alto contenuto in ceneri può causare problemi nella combustione, poiché produce scorie, incrostazioni e corrosione nel dispositivo di combustione, con inevitabile riduzione delle prestazioni dell'impianto stesso [45].

**Tabella 16** - Rispondenza dei parametri qualitativi del pellet prodotto secondo la classificazione EN ISO 17225-2: ✓ (rispetta normativa), X (non rispetta normativa) A1 - A2 - B (classi di appartenenza del parametro di riferimento), n.r. (parametro non rilevato).

Età	3 anni		6 anni		9 anni	
	Piante intere	Fusti	Piante intere	Fusti	Piante intere	Fusti
Frazione						
Diametro	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lunghezza	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Contenuto umidità	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Contenuto in ceneri	X	X	B	B	X	B
PCI	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Massa volum. apparente	X	X	X	X	X	X
N	A1	A1	A1	A1	A1	A1
S	A1	A1	A1	A1	A1	A1
As	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cd	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cr	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cu	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pb	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ni	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zn	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fusibilità	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Durabilità	A1	A2	A1	A2	X	X

A tal riguardo, i risultati meno soddisfacenti sono stati riscontrati per il materiale di 3 anni (sia intero che sramato). In questo caso, quindi, l'allungamento del turno fino a 6 anni può portare ad una significativa riduzione del contenuto in ceneri che rientrerebbe in classe B. Volendo optare per un turno ancora più lungo (9 anni), è necessario utilizzare solo i fusti in quanto la presenza di ramaglie si ripercuote negativamente su tale parametro.

Per quanto concerne la densità apparente nessuna delle tesi analizzate può soddisfare i criteri riferibili alla normativa, in accordo con Monedero et al. [46].

Relativamente alla durabilità meccanica, è possibile rispettare i parametri della classe A1, per il pioppo intero di 3 e 6 anni, e i parametri della classe A2 per pioppo di 3 e 6 anni senza rami.

Il pellet realizzato con materiale di 6 anni può essere considerato, nel complesso, il prodotto qualitativamente migliore essendo caratterizzato da un minor numero di parametri critici rispetto ai turni di 3 e 9 anni.

Altro aspetto da approfondire è quello del contenuto in metalli. Nell'ultimo decennio tali contaminazioni hanno suscitato una crescente attenzione [47] per gli effetti tossicologici riconducibili alle emissioni durante la combustione, soprattutto in considerazione della loro

concentrazione [48] e per il loro utilizzo in sistemi su piccola scala, generalmente non dotati di dispositivi di precipitazione delle polveri [49]. Da questo punto di vista, anche se tutte le tesi soddisfano i requisiti della normativa, il pioppo di 6 anni garantisce comunque il raggiungimento di un livello qualitativo superiore, essendo caratterizzato da valori più bassi relativamente al contenuto in As, Ni, Cr, Pb e Cu. La gestione delle SRF potrebbe quindi essere orientata proprio verso una turnazione media di 5-6 anni.

## 7.2 Pellet da residui forestali: pino eldarica, eucalipto e pino radiata

### *Lunghezza, diametro, massa volumica apparente, durabilità*

La Tabella 17 riporta i valori di lunghezza, diametro, densità apparente e durabilità dei pellet analizzati. Le lunghezze variavano da un minimo di 9 mm per l'eucalipto a 13,26 mm per il pino eldarica, con diametri di poco superiori a 6 mm. I valori maggiori di massa volumica apparente e durabilità sono stati riscontrati per l'eucalipto, 560 kg/m<sup>3</sup> e 96,67%, quelli minori per il pino radiata, 521 kg/m<sup>3</sup> e 95,5%. Il pellet di eucalipto si caratterizzava, quindi, per una minore lunghezza media e valori di massa volumica apparente e durabilità superiori a quelle del pino eldarica e radiata.

**Tabella 17** - Lunghezza, diametro, massa volumica apparente, durabilità del pellet ottenuto da residui forestali di 18 anni. One-Way Anova parametro "lunghezza" -  $p < 0,001$ , One-Way Anova altri parametri -  $p > 0,05$ . Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$  (Tuckey post hoc test).

Pellet	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	Massa vol. apparente (kg m <sup>-3</sup> )	Durabilità (%)
Eucalipto	9,04±3,17 <sup>c</sup>	6,04±0,10 <sup>a</sup>	560±24 <sup>a</sup>	96,67±0,38 <sup>a</sup>
Pino eldarica	13,26±3,61 <sup>ab</sup>	6,29±0,21 <sup>a</sup>	528±24 <sup>a</sup>	95,53±0,49 <sup>a</sup>
Pino radiata	11,29±3,34 <sup>b</sup>	6,24±0,24 <sup>a</sup>	521±27 <sup>a</sup>	95,50±0,70 <sup>a</sup>

### *Potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri*

Il valore di PCI più alto è stato rilevato nel pino Eldarica (17,18 MJ/kg), quello minore nell'eucalipto (15,4 MJ/kg). Il maggior contenuto in ceneri, invece, è stato riscontrato nell'eucalipto (1,21%) mentre il valore più basso nel pino radiata, con una percentuale pari allo 0,86%. Per la fusibilità delle ceneri, infine, le tre specie superavano tutte i 1400°C (Tabella 18).



## Metalli pesanti, zolfo azoto

Come si evince dalla Tabella 19, si registra una maggiore presenza di As, Cd e Cr nel pino eldarica, di Cu, Pb e Ni nel pellet di eucalipto, di N e Zn nel pino radiata.

**Tabella 18** - Potere calorifico, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri del pellet ottenuto da residui forestali. One-Way Anova parametro "PCI" -  $p < 0,001$ ; One-Way Anova parametro "contenuto in ceneri" -  $p < 0,05$ ; One-Way Anova parametro "fusibilità ceneri" -  $p > 0,05$ . Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$  (Tuckey post hoc test).

Pellet	Potere calorifico inferiore (MJ/Kg)	Contenuto in ceneri (%)	Fusibilità ceneri (°C)
Eucalipto	15,42±0,59 <sup>a</sup>	1,21±0,08 <sup>b</sup>	1.428,929±41,96
Pino eldarica	17,17±0,37 <sup>c</sup>	0,97±0,4 <sup>ab</sup>	1.414,209±18,74
Pino radiata	16,77±0,19 <sup>c</sup>	0,86±0,42 <sup>a</sup>	1.438,443±6,14

**Tabella 19** - Determinazione del contenuto di N e metalli pesanti nel pellet ottenuto dai residui forestali. One-Way Anova parametro "N" -  $p < 0,01$ ; One-Way metalli pesanti -  $p > 0,05$ . Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$  (Tuckey post hoc test).

		N	S	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
		%			mg/kg					
Eucalipto	Media	0,41 <sup>ab</sup>	n,r,	0,005	0,202	0,246	0,955	0,076	1,694	14,687
	dev st	0,25		0,002	0,004	0,008	0,019	0,003	0,012	0,317
Pino eldarica	Media	0,33 <sup>b</sup>	n,r,	0,009	0,203	0,254	0,919	0,069	1,684	14,788
	dev st	0,32		0,001	0,003	0,006	0,02	0,003	0,005	0,199
Pino radiata	Media	0,57 <sup>a</sup>	n,r,	0,009	0,200	0,252	0,927	0,072	1,679	14,891
	dev st	0,25		0,002	0,002	0,002	0,037	0,006	0,002	0,512

## Discussioni

I campioni di pellet analizzati non rispettano i parametri indicati dalla norma UNI EN 17225-2 relativamente alla massa volumica apparente e alla durabilità e, nel caso dell'eucalipto, anche per quanto concerne il potere calorifico (Tabella 20). Relativamente alla densità apparente e durabilità, il problema potrebbe essere riconducibile alla bassa potenza della pellettatrice che, in contesti produttivi, potrebbe beneficiare di un maggior rapporto di compressione. Per quanto riguarda il contenuto in azoto e metalli pesanti nessuno dei parametri eccede la normativa e ciò dovrebbe essere considerato ottimale nell'ambito di un loro potenziale impiego.

Considerando, nel complesso, tutti i parametri valutati, il pino eldarica sembrerebbe essere quello che garantisce una maggiore qualità generale del prodotto, distinguendosi dal pino radiata per un minor contenuto in azoto, L'eucalipto, invece, risulterebbe quello più carente manifestando criticità in merito al potere calorifico ed evidenziando un maggior contenuto in ceneri, Relativamente a quest'ultimo parametro, l'eucalipto si posizionerebbe in classe B mentre le due tipologie di pino ricadrebbero in classe A2.

**Tabella 20** - Rispondenza dei parametri qualitativi del pellet prodotto secondo la classificazione EN ISO 17225-2: ✓ (rispetta normativa), X (non rispetta normativa) A1 - A2 - B (classi di appartenenza del parametro di riferimento), n,r, (parametro non rilevato).

Parametri	Eucalipto	Pino eldarica	Pino radiata
Diametro	✓	✓	✓
Lunghezza	✓	✓	✓
Contenuto di umidità	✓	✓	✓
Contenuto in ceneri	B	A2	A2
PCI	X	✓	✓
Massa vol. apparente	X	X	X
N	A2	A2	B
S	n r	n r	n r
As	✓	✓	✓
Cd	✓	✓	✓
Cr	✓	✓	✓
Cu	✓	✓	✓
Pb	✓	✓	✓
Ni	✓	✓	✓
Zn	✓	✓	✓
Fusibilità	A1	A1	A1
Durabilità	X	X	X

### 7.3 Pellet da residui agricoli di nocciolo e ulivo

*Lunghezza, diametro, massa volumica apparente, durabilità*

Il pellet di ulivo è risultato più lungo del 37% rispetto a quello di nocciolo (16,66 e 10,47 mm rispettivamente) mentre il diametro era pari a 6,2 mm per entrambi i prodotti.

Il pellet di nocciolo si caratterizzava, invece, per una massa volumica apparente leggermente superiore, 581,30 kg/m<sup>3</sup> vs 562,38 kg/m<sup>3</sup>. Per quanto riguarda la durabilità meccanica le due

tipologie di pellet presentavano valori di poco superiori al 98%. Il quadro complessivo dei dati rilevati è riportato in Tabella 21.

**Tabella 21** - Lunghezza, diametro, massa volumica apparente, durabilità del pellet di nocciolo e ulivo.

Pellet	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	Massa vol. apparente (kg m <sup>-3</sup> )	Durabilità (%)
Nocciolo	10,47±2,67 <sup>b</sup>	6,20±0,12 <sup>a</sup>	581,30±2,89 <sup>b</sup>	98,05±0,47 <sup>a</sup>
Ulivo	16,66±1,82 <sup>a</sup>	6,20±0,10 <sup>a</sup>	562,38±6,41 <sup>a</sup>	98,26±0,57 <sup>a</sup>

#### Potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri

Il potere calorifico rilevato per il pellet di nocciolo è stato pari a 17,21 MJ/kg, valore appena più alto rispetto a quello del pellet di ulivo (16,83 MJ/kg) (Tabella 8). Il pellet di nocciolo presentava un contenuto di ceneri del 3,08% mentre quello rilevato per l'ulivo era del 2,54%. La temperatura di fusibilità delle ceneri, invece, era superiore a 1.400 °C per entrambe le tipologie di pellet (Tabella 22).

**Tabella 22** - Potere calorifico, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri del raffinato e del pellet. Potere calorifico (Kruskal-Wallis and Mann-Whitney pairwise comparisons Bonferroni corrected):  $H = 13,72$ ,  $H_c = 13,73$ ,  $p < 0,01$ ; contenuto in ceneri (Welch F test and Tuckey post hoc test):  $F = 37,92$ ,  $df = 8,549$ ,  $p < 0,001$ ; fusibilità delle ceneri (One-Way Anova e Tuckey post hoc test):  $F = 1071$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ , Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$ .

	Potere calorifico inferiore (MJ/Kg)	Contenuto in ceneri (%)	Fusibilità ceneri (°C)
Pellet di nocciolo	17,21±0,28 <sup>b</sup>	3,08±0,62 <sup>b</sup>	1448±2,19 <sup>d</sup>
Pellet di ulivo	16,83±0,02 <sup>b</sup>	2,54±0,12 <sup>a</sup>	1462±1,82 <sup>c</sup>
Raffinato di nocciolo	16,18±0,38 <sup>a</sup>	3,54±0,15 <sup>ab</sup>	1379±3,05 <sup>a</sup>
Raffinato di ulivo	16,31±0,29 <sup>a</sup>	2,80±0,12 <sup>a</sup>	1440±2,77 <sup>b</sup>

#### Metalli pesanti, zolfo, azoto

Analizzando nello specifico i dati riportati in Tabella 23 e 24, è possibile evidenziare una maggiore presenza di Cu, Pb e Ni nel pellet di nocciolo e una maggiore quantità di zinco nel pellet di ulivo. Nel complesso, la presenza di metalli pesanti era più alta nel nocciolo (di circa il 65%) e, in

particolare, la presenza di 6,10 mg/kg di rame potrebbe esser dovuta a precedenti trattamenti rameici finalizzati a contrastare attacchi parassitari.

Il contenuto di azoto è risultato pari allo 0,77% per il nocciolo e all'1,24% per l'olivo mentre per entrambi la concentrazione di S era dello 0%.

**Tabella 23** - Determinazione del contenuto di N, S e metalli pesanti nel pellet di nocciolo.

Pellet nocciolo	N	S	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
	%		mg/kg						
Media	0,77	0,00	0,02	0,02	0,21	6,10	0,21	1,21	4,51
dev st	0,21	0,00	0,00	0,00	0,01	0,13	0,01	0,00	0,26

**Tabella 24** - Determinazione del contenuto di N, S e metalli pesanti nel pellet di olivo.

Pellet olivo	N	S	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
	%		mg/kg						
Media	1,35	0,00	0,08	0,01	0,25	3,56	0,02	0,09	4,14
dev st	0,41	0,00	0,01	0,01	0,04	0,29	0,00	0,01	0,15

### Discussioni

Le masse volumiche apparenti dei due tipi di pellet non raggiungono la soglia stabilita dalla normativa, anche se i valori individuati non si discostano di molto dal limite dei 600 kg/m<sup>3</sup>. Il più alto valore riscontrato per il nocciolo potrebbe essere riconducibile alla minore lunghezza dei cilindretti e ciò si traduce in un maggior quantitativo di prodotto e di energia trasportati per unità di volume.

Per quanto riguarda la durabilità e il potere calorifico, i due prodotti rientrano nel range dei valori di riferimento. Il contenuto in ceneri del nocciolo risulta superiore del 20,3% rispetto a quanto rilevato per l'olivo ma nessuno dei due rientra nella soglia massima del 2% indicata per la classe B.

Per quanto concerne la fusibilità delle ceneri, i valori rilevati superano ampiamente la soglia minima di 1.200° C imposta dalla normativa, con 1.448 °C e 1.462 °C rispettivamente per nocciolo e ulivo.

Dei 7 metalli pesanti rilevati 5 risultano presenti in maggiori concentrazioni nel pellet del nocciolo (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni) e due in quello dell'olivo (Zn e As). Nel complesso, ad ogni modo, i metalli

pesanti rilevati risultano conformi a quanto indicato dalla normativa vigente. Nell'olivo risulta presente una maggiore concentrazione di azoto, superiore alla soglia dell'1% indicato in normativa per la classe B. Ciò potrebbe far pensare ad una, seppur minima, contaminazione accidentale del prodotto lungo la catena di produzione e trasporto.

Prendendo in considerazione i principali parametri qualitativi valutati, il pellet di olivo risulterebbe, nel complesso, qualitativamente superiore ad eccezione della massa volumica apparente e del potere calorifico. Se consideriamo, inoltre, i maggiori quantitativi di biomassa residuale prodotti dagli oliveti e, il minore contenuto di umidità alla raccolta, appare evidente un ulteriore punto a favore per questa coltura.

**Tabella 25** - Rispondenza dei parametri qualitativi del pellet prodotto secondo la classificazione EN ISO 17225-2: ✓ (rispetta normativa), X (non rispetta normativa) A1 - A2 - B (classi di appartenenza del parametro di riferimento), n,r, (parametro non rilevato).

Parametri	Nocciolo	Ulivo
Diametro	✓	✓
Lunghezza	✓	✓
Contenuto di umidità	✓	✓
Contenuto in ceneri	X	X
PCI	✓	✓
Massa volume. apparente	X	X
N	A1	X
S	A1	A1
As	✓	✓
Cd	✓	✓
Cr	✓	✓
Cu	✓	✓
Pb	✓	✓
Ni	✓	✓
Zn	✓	✓
Fusibilità	A1	A1
Durabilità	A1	AB

Riassumendo, le due tipologie di pellet analizzate soddisfano i requisiti per diametro, lunghezza, contenuto di umidità, fusibilità della cenere, potere calorifico inferiore, nonché S, metalli pesanti e durabilità. Per quanto riguarda invece il contenuto di ceneri, azoto (per il pellet di olivo) e la massa volumica, i valori rilevati non rispettano quelli indicati dalla normativa (Tabella 25).

Questo problema potrebbe essere superato considerando la possibilità di miscelare, in percentuali variabili a seconda del risultato da ottenere, questo materiale con legno di altre specie raggiungendo così le classi di qualità superiori.

#### 7.4 Pellet da residui di verde urbano: platano, leccio, pino domestico, eucalipto

##### *Lunghezza, diametro e massa volumica apparente, durabilità*

La Tabella 26 riporta i valori di lunghezza, diametro, densità apparente e durabilità dei pellet analizzati. Le lunghezze variavano da un minimo di 11,9 mm per il platano a 14,6 mm per l'eucalipto, con diametri di poco superiori a 6 mm. I valori maggiori di massa volumica apparente e durabilità sono stati riscontrati per il leccio, 637 kg/m<sup>3</sup> e 98,4%, quelli minori per il pino domestico, 532 kg/m<sup>3</sup> e 95,5%.

**Tabella 26** - Lunghezza, diametro, massa volumica apparente, durabilità del pellet ottenuto da residui di verde urbano. One-Way Anova. Lettere differenti indicano differenze significative ad un livello  $p < 0,05$ .

Pellet	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	Massa vol. apparente (kg m <sup>-3</sup> )	Durabilità (%)
Leccio	12,72±2,3 <sup>a</sup>	6,20±0,1 <sup>a</sup>	637,6±1,6 <sup>a</sup>	98,40±0,7 <sup>a</sup>
Eucalipto	14,67±1,2 <sup>b</sup>	6,24±0,2 <sup>a</sup>	615,8±11,4 <sup>a</sup>	95,53±0,5 <sup>b</sup>
Pino domestico	12,38±1,9 <sup>a</sup>	6,25±0,21 <sup>a</sup>	532,4±7,2 <sup>b</sup>	95,50±0,7 <sup>b</sup>
Platano	11,95±2,2 <sup>a</sup>	6,08±0,12 <sup>a</sup>	610,45±6,8 <sup>a</sup>	95,8±0,4 <sup>b</sup>

##### *Potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri, fusibilità delle ceneri*

Il potere calorifico inferiore variava tra 15,11 MJ/kg del leccio e 18,37 MJ/kg del pino. Il contenuto in ceneri risultava inferiore all'1% per l'eucalipto e il pino, inferiore all'1,5% per il leccio, superiore al 2% per il platano. La fusibilità delle ceneri, infine, risultava superiore a 1.400°C (Tabella 27).

**Tabella 27** - Potere calorifico, contenuto in ceneri e fusibilità dei diversi tipi di biomassa, One way anova: potere calorifico -  $F = 4,956$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,05$ ; contenuto in ceneri -  $F = 40,9$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ .

Biomassa	Potere calorifico inferiore (MJ kg <sup>-1</sup> )	Contenuto in ceneri (%)	Fusibilità ceneri (°C)
----------	--	-------------------------	------------------------

Leccio	15,11±0,16 <sup>a</sup>	1,34±0,2 <sup>b</sup>	1437 <sup>a</sup>
Eucalipto	15,13±0,55 <sup>a</sup>	0,87±0,23 <sup>ab</sup>	1429 <sup>a</sup>
Pino domestic	18,37±2,29 <sup>b</sup>	0,38±0,19 <sup>a</sup>	1426 <sup>a</sup>
Platano	16,15±0,32 <sup>ab</sup>	2,10±0,15 <sup>c</sup>	1412 <sup>a</sup>

### Metalli pesanti, zolfo, azoto

Per quanto concerne l'analisi del contenuto in zolfo, azoto, cloro e metalli pesanti si evidenziano delle criticità per il superamento di alcuni dei limiti definiti dalla normativa. Tali criticità interessavano, nel caso specifico, l'azoto, con valori a norma solo per il pino il cadmio, con valori a norma solo per il platano e il cloro, che eccede il limite per l'eucalipto. Tutti gli altri parametri rientravano, invece, nei valori soglia, con livelli inferiori o uguali ad 1 mg/kg per arsenico, cromo e rame, valori inferiori a 1,5 mg/kg per piombo, nichel e zinco. In Tabella 28 vengono evidenziati i valori rilevati e l'analisi statistica.

**Tabella 28** – Contenuto in Azoto, zolfo cloro e metalli pesanti, One way anova (df=3): S (F=122,5, p<0,001); N (F = 3,84, p>0,05); Cl (F = 59,5, p<0,001); Cd (F = 37,58, p<0,001); Cr (F = 3,84, p>0,05); Cu (F = 16,86, p<0,001); Pb (F = 87,66, p<0,001); Ni (F = 67,02, p<0,001); Zn (F = 85,72, p<0,001), Kruskal Wallis: As (H = 3,308, Hc = 0,3466, P>0,05).

	S	N	Cl	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
Biomassa	%			mg/kg						
Leccio	0,016 <sup>c</sup> ±0,001	1,59 <sup>a</sup> ±0,51	0,022 <sup>a</sup> ±0,001	0,71 <sup>a</sup> ±0,14	0,85 <sup>b</sup> ±0,11	1,00 <sup>b</sup> ±0,16	0,48 <sup>c</sup> ±0,05	1,44 <sup>b</sup> ±0,22	1,53 <sup>b</sup> ±0,27	1,49 <sup>b</sup> ±0,23
Eucalipto	0,37 <sup>a</sup> ±0,002	1,55 <sup>a</sup> ±0,69	0,034 <sup>a</sup> ±0,002	0,79 <sup>a</sup> ±0,07	0,66 <sup>b</sup> ±0,05	0,91 <sup>b</sup> ±0,03	0,37 <sup>b</sup> ±0,02	1,29 <sup>b</sup> ±0,05	1,32 <sup>b</sup> ±0,05	1,31 <sup>b</sup> ±0,04
Pino domestico	0,015 <sup>c</sup> ±0,001	0,72 <sup>a</sup> ±0,18	0,023 <sup>b</sup> ±0,001	0,79 <sup>a</sup> ±0,05	0,86 <sup>b</sup> ±0,16	0,88 <sup>b</sup> ±0,02	0,34 <sup>ab</sup> ±0,01	1,22 <sup>b</sup> ±0,02	1,31 <sup>b</sup> ±0,04	1,30 <sup>b</sup> ±0,02
Platano	0,023 <sup>b</sup> ±0,002	1,87 <sup>a</sup> ±0,06	0,022 <sup>b</sup> ±0,001	0,63 <sup>a</sup> ±0,09	0,10 <sup>a</sup> ±0,03	0,48 <sup>a</sup> ±0,25	0,24 <sup>a</sup> ±0,07	0,12 <sup>a</sup> ±0,03	0,11 <sup>a</sup> ±0,00	0,12 <sup>a</sup> ±0,01

### Discussioni

Le masse volumiche apparenti rilevate superano la soglia dei 600 kg/m<sup>3</sup> indicati dalla normativa, eccezion fatta per il pino domestico.

Potere calorifico e ceneri risultano essere tra i parametri più importanti per la caratterizzazione qualitativa di un combustibile solido. Relativamente al potere calorifico, il leccio e l'eucalipto, attestandosi intorno ai 15 MJ/kg, non rientrano nella normativa di riferimento. Il pino

domestico supera ampiamente la soglia dei 16,5 MJ/kg mentre per il platano i valori sono di poco inferiori.

Per le ceneri il pino rientrerebbe in classe A1, l'eucalipto in classe A2, il leccio in classe B mentre, i valori rilevati per il platano non rientrano nei limiti previsti dalla normativa. Analizzando la Tabella 29 possiamo identificare quali parametri qualitativi vengono rispettati dai diversi tipi di biomassa, in riferimento alla EN ISO 17225-2.

Dei 18 parametri esaminati 3 non vengono rispettati da leccio, pino e platano, 6 dall'eucalipto. Dal punto di vista chimico l'eucalipto risulta essere la specie più penalizzata con 4 parametri fuori soglia.

**Tabella 29** - Rispondenza dei parametri qualitativi del pellet prodotto secondo la classificazione EN ISO 17225-2: ✓ (rispetta normativa), X (non rispetta normativa) A1 - A2 - B (classi di appartenenza del parametro di riferimento), n,r, (parametro non rilevato).

Parametri	Leccio	Eucalipto	Pino domestico	Platano
Diametro	✓	✓	✓	✓
Lunghezza	✓	✓	✓	✓
Contenuto di umidità	✓	✓	✓	✓
Contenuto in ceneri	B	A2	A1	X
PCI	X	X	A1	X
Massa vol. apparente	✓	✓	X	✓
N	X	X	B	X
S	A1	A1	A1	A1
Cl	B	X	B	B
As	✓	✓	✓	✓
Cd	X	X	X	✓
Cr	✓	✓	✓	✓
Cu	✓	✓	✓	✓
Pb	✓	✓	✓	✓
Ni	✓	✓	✓	✓
Zn	✓	✓	✓	✓
Fusibilità	A1	A1	A1	A1
Durabilità	A1	X	X	X



---

## 8. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

---

*Giulio Sperandio, Andre Acampora, Vincenzo Civitarese*

Nonostante le certificazioni rappresentino una garanzia per il consumatore, anche e soprattutto in un'ottica di globalizzazione dei mercati, esiste una quota di prodotto extra certificazione, generalmente proveniente da microfiliere di autoconsumo, mercati a chilometro zero o filiere corte. Non di rado, inoltre, anche pellet commerciali e classificati in A1 o A2 non rispettano, in realtà, tutti i parametri evidenziati e stampati sulla confezione. In quest'ottica, quindi, considerando anche gli obiettivi del progetto AGROENER, si vuole procedere ad una classificazione alternativa del prodotto assegnando a ciascun pellet prodotto un determinato punteggio in grado di soppesare i vari parametri di riferimento.

Tralasciando il contenuto di zolfo, in quanto non disponibile per tutte le tesi e il contenuto di umidità, il cui valore dipende più dalla gestione del materiale di partenza che dalla specie, è possibile considerare 3 parametri fisici (lunghezza, diametro, massa volumica apparente), un parametro meccanico (durabilità), un parametro energetico (PCI), 2 parametri chimici (ceneri e fusibilità), oltre alla presenza di 8 elementi chimici tra azoto e metalli pesanti. La classificazione prevede di assegnare i seguenti punteggi:

- lunghezza, diametro, massa volumica apparente, PCI: 1 punto per parametro rispettato;
- durabilità, ceneri, fusibilità: 1 punto per parametro in classe A1; 0,6 punti per parametro in classe A2; 0,3 punti per parametro in classe B;
- elementi chimici: 0,2 punti per parametro rispettato.

La Tabella 30 riporta i risultati e la classificazione del materiale secondo lo schema proposto. Orientativamente possiamo considerare insufficiente un punteggio inferiore a 6, sufficiente un punteggio compreso tra 6 e 7, buono un punteggio tra 7 e 8, ottimo un punteggio superiore a 8. Come è possibile notare il pino domestico e il platano hanno ottenuto il punteggio più alto classificandosi come un buon prodotto mentre il risultato peggiore è relativo all'eucalipto proveniente da residui forestali che, insieme al pioppo di 9 anni (sia intero che sramato), non raggiunge la sufficienza. In tutti gli altri casi i prodotti presentano caratteristiche qualitative ritenute sufficienti per la loro commercializzazione. Per quanto concerne i pini le differenze nel punteggio

finale sono ascrivibili al differente contenuto in ceneri e alla maggiore durabilità del pellet da pino domestico.

Miscelando le varie tipologie di biomasse è possibile migliorare le caratteristiche generali del prodotto finale, consentendo, per alcune delle specie studiate, il rispetto dei parametri richiesti (Tabella 31). Prendendo in esame il caso del materiale proveniente dalla gestione del verde urbano, ad esempio, sappiamo che il pino domestico è la specie caratterizzata da valori ottimali di ceneri e potere calorifico. Ipotizzando miscele al 50% con le altre specie, sarebbe garantita la soglia dei 16,5 MJ/kg, migliorando al contempo anche la classe del prodotto in termini di contenuto in ceneri.

**Tabella 30** - Classificazione qualitativa del pellet prodotto in funzione dei parametri rispettati: lunghezza, diametro, massa volumica apparente, PCI: 1 punto per parametro rispettato; durabilità, ceneri, fusibilità: 1 punto per parametro in classe A1; 0,6 punti per parametro in classe A2; 0,3 punti per parametro in classe B; elementi chimici: 0,2 punti per parametro rispettato.

Parametri e relativo punteggio massimo assegnabile						
Tipologia/Specie	Fisici (max 3)	Meccanici (max 1)	Energetici (max 1)	Chimici (max 2)	Elementi (max 1,6)	Punteggio (max 8,6)
SRF 3 anni pianta intera – pioppo	2	1	1	1	1,6	6,6
SRF 3 anni pianta sramata – pioppo	2	0,6	1	1	1,6	6,2
SRF 6 anni pianta intera – pioppo	2	1	1	1,3	1,6	6,9
SRF 6 anni pianta sramata – pioppo	2	0,6	1	1,3	1,6	6,5
SRF 9 anni pianta intera – pioppo	2	0	1	1	1,6	5,6
SRF 9 anni pianta sramata – pioppo	2	0	1	1,3	1,6	5,9
Residui forestali – eucalipto	2	0	0	1,3	1,6	4,9
Residui forestali – pino eldarica	2	0	1	1,6	1,6	6,2
Residui forestali – pino radiata	2	0	1	1,6	1,6	6,2
Residui agricoli, nocciolo	2	1	1	1	1,6	6,6
Residui agricoli – ulivo	2	0,6	1	1	1,4	6,0
Verde urbano – leccio	3	1	0	1,3	1,2	6,5
Verde urbano – eucalipto	3	1	0	1,6	1,2	6,8
Verde urbano – pino domestico	2	1	1	2	1,4	7,4
Verde urbano – platano	3	1	1	1	1,4	7,4

Relativamente a quest'ultimo aspetto, infatti, l'eucalipto passerebbe da A2 ad A1, il leccio da B ad A2 e il platano, che non rientrava in nessuna categoria, rientrerebbe in classe B con un valore limite vicinissimo alla classe A2. In tali circostanze sarebbe sufficiente incrementare la percentuale

di pino del 5% (55% pino e 45% platano) per rientrare nella classe intermedia. Quello delle ceneri è un problema annoso in grado di creare problemi in fase di combustione quali incrostazioni, corrosioni e riduzioni delle performance dell'impianto. Relativamente alla fusibilità, invece, rientrano tutti in classe A1 senza necessità di miscelazione.

Facendo, infine, riferimento alle analisi chimiche tutti i materiali oggetto di studio rientrano nella normativa di riferimento, se escludiamo principalmente azoto e cadmio. Per questi ultimi, purtroppo i parametri limite vengono rispettati, solo dal pino, per quanto concerne l'azoto (classe B), e dal platano per quanto concerne il cadmio. Per quest'ultimo elemento è possibile rientrare nella normativa miscelando il platano con le altre essenze al 50%, cosa, invece, non possibile per l'azoto.

**Tabella 31** – *Variazione del potere calorifico e del contenuto in ceneri di platano, leccio e eucalipto a seguito della procedura di miscelazione.*

POTERE CALORIFICO INFERIORE						
Specie	VALORE INIZIALE (MJ/kg)	CLASSE INIZIALE	MISCELA (50%+50%)	VALORE FINALE (MJ/kg)	VARIAZIONE (%)	CLASSE FINALE
Pino	18,37	A1	-	-	-	-
Platano	16,15	Nessuna	Pino+Platano	17,26	+6,05	A1
Leccio	15,11	Nessuna	Pino+Leccio	16,74	+10,80	A1
Eucalipto	15,13	Nessuna	Pino+Eucalipto	16,75	+10,72	A1
CONTENUTO IN CENERI						
Specie	VALORE INIZIALE (%)	CLASSE INIZIALE	MISCELA (50%+50%)	VALORE FINALE (%)	VARIAZIONE (%)	CLASSE FINALE
Pino	0,38	A1	-	-	-	-
Platano	2,10	Nessuna	Pino+Platano	1,24	-40,91	A2/B
Leccio	1,34	B	Pino+Leccio	0,86	-35,73	A2
Eucalipto	0,87	A2	Pino+Eucalipto	0,63	-28,07	A1

Nel caso del verde urbano, quindi, due delle quattro specie analizzate non raggiungevano la sufficienza ma, in caso di miscelazione con pino domestico al 50%, il leccio passerebbe da 5,5 a 6,8 punti (incremento dovuto all'aumento di PCI e passaggio da B ad A2 per il contenuto in ceneri) mentre l'eucalipto, per gli stessi effetti descritti per il leccio, si arriverebbe ad un punteggio di 7,2 passando da sufficiente a buono.

Un ultimo aspetto da analizzare è quello della gestione del materiale in fase di essiccazione. Oltre al pretrattamento termico indotto da appositi dispositivi, argomento discusso nell'allegato 1

del presente manuale, è importante fornire anche indicazioni sui processi di disidratazione naturale che possono essere utilizzati in fase di stoccaggio. Lo stoccaggio in campo, infatti, garantisce una parziale disidratazione del materiale, andando a ridurre il dispendio energetico richiesto nella successiva fase di essiccazione.

L'esperienza condotta in merito allo stoccaggio del materiale intero, frazionato o sminuzzato ha evidenziato la possibilità di ridurre sensibilmente il contenuto di umidità iniziale riuscendo a raggiungere, come evidenziato, i valori ottimali per poter procedere alla successiva fase di pellettizzazione senza bisogno di trattamenti energivori. Anche nel caso di disidratazione parziale, ad ogni modo, appaiono evidenti i vantaggi relativi ad un minore dispendio energetico della fase di essiccazione. Il processo di disidratazione risulta significativamente influenzato dall'età della pianta e dalla frazione considerata (pianta intera, solo fusto, cimali e ramaglie), come evidenziato dall'analisi statistica condotta sul prodotto fresco e disidratato. Ad esempio, le piante di pioppo di 6 anni hanno conservato un maggiore contenuto di umidità rispetto a quelle di 3 anni, proprio in virtù delle maggiori dimensioni diametriche lungo tutto il profilo longitudinale.

All'aumentare delle dimensioni, quindi, è necessario procedere ad una riduzione del prodotto in scaglie, in modo da favorire ulteriormente il processo di disidratazione andando ad ampliare la superficie di scambio con l'ambiente esterno. In tale situazione risulta necessario favorire l'esposizione al sole, nelle ore più calde della giornata e la protezione del prodotto dalle precipitazioni. Operando in tale direzione ciascuna tipologia di materiale ha raggiunto, a fine trattamento, un contenuto di umidità compreso tra il 10 e il 15%.

È bene sottolineare che la gestione del processo fa riferimento a quantitativi modesti direttamente impiegati nella sperimentazione. Discorso diverso è l'applicazione in processi produttivi, che dovrebbero prevedere apposite superfici, relativi piazzali e coperture mobili o in materiale trasparente. Altri aspetti da considerare riguardano le variazioni di umidità ascrivibili ai processi di raffinazione e pellettizzazione, che possono portare a riduzioni importanti dei valori di umidità e di cui si dovrà tener conto durante la fase di programmazione. Una eccessiva disidratazione del materiale prima dell'avvio delle fasi meccanizzate potrebbe comportare, di fatto, un'eccessiva perdita di umidità a discapito della qualità finale.

Tali risultati, pur essendo strettamente correlati alle condizioni climatiche registrate nel corso della sperimentazione, forniscono, comunque, importanti indicazioni su quelle che

potrebbero essere le pratiche aziendali volte a contenere i costi energetici, ambientali ed economici complessivi.

Per quanto concerne la perdita di sostanza secca, infine, diversamente da quanto osservato nello stoccaggio del cippato fresco (Barontini et al, 2014) i risultati ottenuti indicano variazioni dell'ordine del 10% circa per le frazioni più importanti, sebbene non siano state riscontrate differenze statisticamente significative.

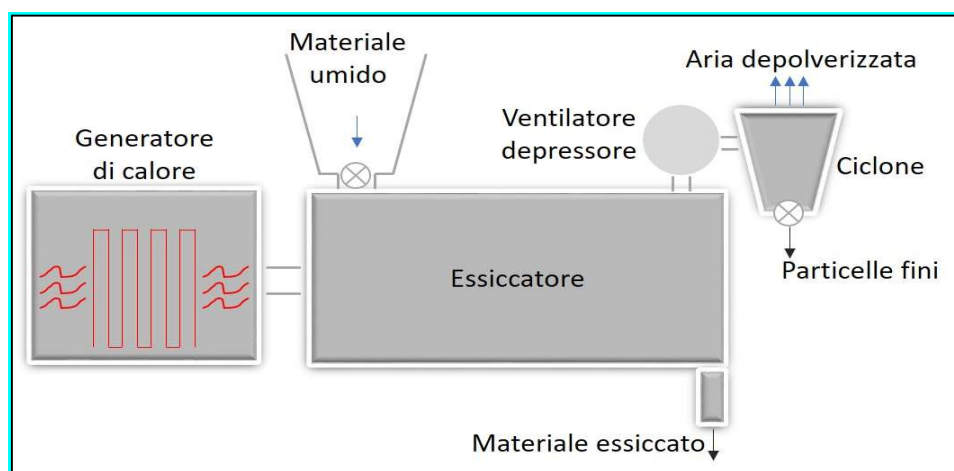
## 9. IL PRETRATTAMENTO TERMICO DELLA BIOMASSA – ALLEGATO TECNICO

*Andrea Acampora, Vincenzo Civitarese, Giulio Sperandio*

Il pretrattamento termico della biomassa è un processo finalizzato all'estrazione di tutta o parte dell'acqua contenuta nel prodotto da trattare e richiede un impegno economico ed energetico rilevante. Tale procedura viene utilizzata in filiere energetiche come la gassificazione, la produzione di bricchetti, pellet, ecc. Gli essiccatori, in linea di principio, dovrebbero garantire un basso consumo energetico, una ridotta manutenzione, una buona automaticità e una ridotta produzione di polveri, aspetto, quest'ultimo, strettamente correlato con la tecnologia impiegata, velocità di processamento e granulometria del prodotto in entrata. In generale, più fine sarà la granulometria del materiale in entrata maggiore sarà la quantità di particelle asportata dal fluido essiccante.

I sistemi più utilizzati sono quelli rotativi a tamburo oppure a tappeto (o nastro). Le dimensioni di tali dispositivi variano in funzione della capacità operativa che si vuole raggiungere e in certi contesti possono richiedere superfici importanti, non sempre disponibili a livello aziendale.

**Un essiccatore** si compone di una serie di dispositivi che garantiscono l'automazione e il corretto funzionamento di tutte le fasi del processo. I componenti principali sono il generatore di calore, i dispositivi di alimentazione e scarico, l'essiccatore e il sistema di abbattimento delle polveri (Figura 1).



**Figura 1** - Schema semplificato di un essiccatore per biomassa

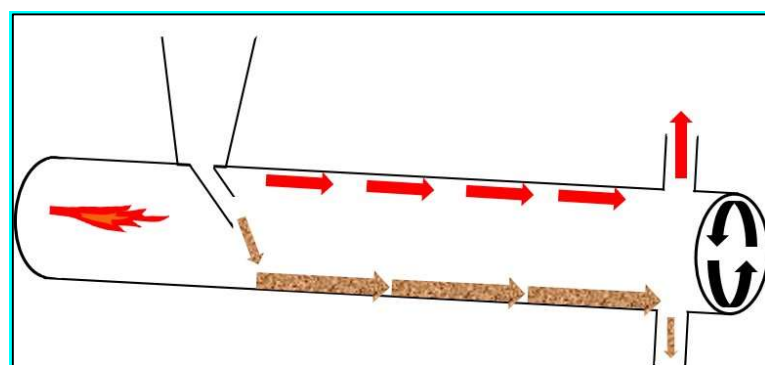
- Generatore termico: gli essiccatori possono essere alimentati con bruciatore dedicato (gpl, gasolio, metano, cippato, pellet, biomassa in generale), oppure operare in un processo integrato di cogenerazione, utilizzando quindi il calore di risulta con relativo abbattimento dei costi energetici. In un processo di combustione di una centrale a biomassa, ad esempio, l'energia contenuta nei fumi di combustione e nell'aria calda generata dal raffreddamento del motore può essere recuperata tramite un sistema di recupero termico invece di essere dissipato nell'ambiente. Il riscaldamento del materiale da essiccare può avvenire in modo diretto o indiretto. *Il riscaldamento diretto* si usa quando il materiale da trattare può entrare in contatto con i gas caldi. Ciò si verifica quando si brucia un gas non inquinante o quando il prodotto non risente qualitativamente dell'inquinamento dovuto al combustibile (ad esempio essiccazione di fanghi, legno, digestato). *Il riscaldamento indiretto* si usa, invece, quando il materiale da trattare non deve venire a contatto con i prodotti della combustione. In questo caso il calore viene trasmesso in modo indiretto tramite uno scambiatore termico, utilizzando, ad esempio, aria calda prodotta dallo scambio di calore tra aria esterna (prelevata a temperatura ambiente da un ventilatore) e acqua calda proveniente dal motore di cogenerazione.
- Sistema di stoccaggio e alimentazione: il prodotto da trattare viene generalmente caricato all'interno di una tramoggia o serbatoio ed introdotto nell'essiccatore per caduta, tramite una coclea o nastro trasportatore. Il punto di ingresso del materiale è generalmente isolato dall'ambiente esterno tramite una valvola stellare, impedendo in tal modo l'ingresso di aria a temperatura ambiente nel corpo essiccante, con conseguente diminuzione del rendimento del sistema.
- Corpo essiccante: le caratteristiche tecniche e funzionali di un essiccatore dipendono dalla tecnologia impiegata e possono essere distinti in tre gruppi: ***a tamburo, a tappeto, ad infrarossi.***
- Sistema di abbattimento delle polveri: indipendentemente dalla tipologia di essiccatore l'aria di processo, carica di polveri, può essere reimpressa in atmosfera solo dopo un processo di abbattimento delle polveri. Generalmente un ventilatore depressore spinge quest'aria all'interno di un ciclone, completo di valvola stellare, che provvede alla sua depolverizzazione. All'interno del ciclone l'aria carica di particelle fini assume un moto a spirale verso il basso. La forza centrifuga generata consente alle particelle più pesanti di

aderire alle pareti interne del dispositivo e di scivolare verso il fondo. La parte inferiore del ciclone (di forma conica) produce, a causa della differente pressione esistente fra le aperture di entrata e uscita, un'inversione del senso di rotazione del flusso d'aria che risale in una spirale più stretta verso il tubo di scarico, dove fuoriesce depurata. Le frazioni di polveri particolarmente sottili non abbattute dal ciclone possono essere a loro volta tratteneute da specifici filtri dell'aria, assicurando il rispetto dei parametri di inquinamento atmosferico imposto dalle vigenti normative.

- Dispositivo di scarico: il materiale essiccato viene scaricato a fine ciclo in appositi container oppure movimentato tramite nastro trasportatore fino a un punto di stoccaggio.

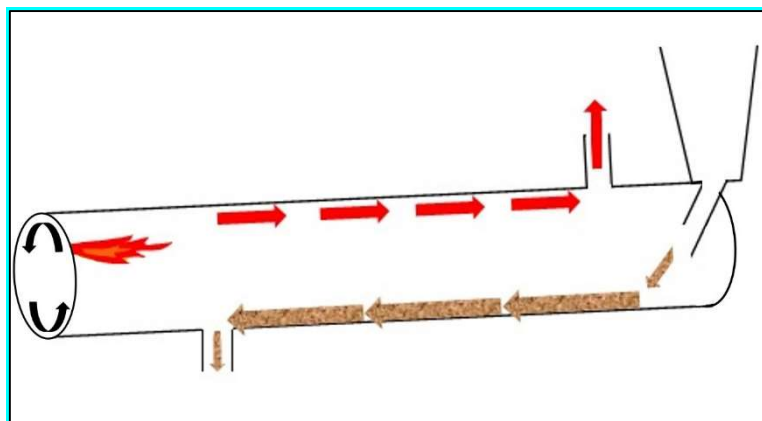
**Gli essiccatori a tamburo** consistono in un cilindro rotativo dotato di palette di rovesciamento e avanzamento del materiale, investito da una corrente d'aria calda prodotta dal generatore termico. In tal modo viene a formarsi un flusso d'aria saturo d'acqua, richiamato dal ventilatore-depressore, che favorisce anche la movimentazione del prodotto verso il dispositivo di scarico.

È possibile operare in equicorrente, quando il flusso di cippato e di aria calda si muovono parallelamente (Figura 2), oppure in controcorrente, quando il flusso di cippato e di aria calda si muovono in direzione opposta tra loro (Figura 3). Nel caso di materiale lignocellulosico è preferibile lavorare in equicorrente per evitare problemi di adesione al corpo macchina e di torrefazione della biomassa.



**Figura 2** - Schema semplificato di funzionamento di un essiccatore rotativo equicorrente.



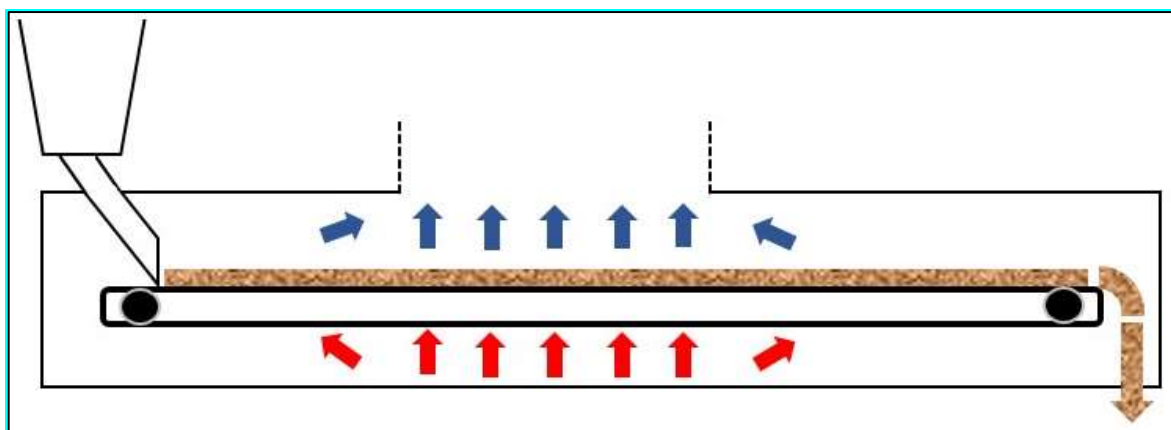


**Figura 3** - Schema semplificato di funzionamento di un essiccatore rotativo controcorrente.

**Gli essiccatori a tappeto** possono essere a ciclo continuo o alternato e si compongono di tappeti mobili, anche sovrapposti, la cui lunghezza e/o velocità di avanzamento variano in funzione dei quantitativi da trattare e dell'umidità di partenza. I tappeti sono collocati all'interno di container chiusi in modo da ridurre al minimo la dispersione di energia termica.

Il materiale umido viene scaricato, tramite una tramoggia o altro tipo di alimentatore, sul tappeto di essiccazione composto da una serie di piastre in acciaio forato che permettono il passaggio di aria calda a 70° - 90°C (Figura 4).

Nelle macchine più complesse la velocità di avanzamento del materiale viene regolata automaticamente tramite appositi sensori di temperature e umidità.



**Figura 4** - Schema semplificato di funzionamento di un essiccatore a nastro,

**Gli essiccatori ad infrarosso** rappresentano una categoria di attrezzatura che, seppur non propriamente impiegabile, meritano di essere menzionati per le potenzialità offerte e i possibili sviluppi futuri nel settore. Il calore viene trasmesso per irraggiamento di onde elettromagnetiche, aventi frequenze comprese tra quelle della luce visibile e quelle delle microonde (0,76  $\mu\text{m}$ -1 mm).

Vengono utilizzati per essiccare materiali con una umidità di partenza del 20% circa (ad esempio segatura), con un abbattimento del contenuto di umidità del 10%. Effettuando più passaggi è possibile disidratare prodotti con un contenuto di umidità iniziale superiore a quanto sopra specificato.

Di seguito viene proposto un elenco, non esaustivo, delle tecnologie disponibili sul mercato per l'essiccamento della biomassa con indicazioni della ditta produttrice e delle principali caratteristiche di funzionamento.

Essiccatore ESPE – [www.espegroup.com](http://www.espegroup.com)

- Produttore: Espe srl, Grantorto (PD),
- Tipologia di essiccatore: non definita,
- Caratteristiche: il sistema di essiccazione permette di utilizzare 25KWht di energia termica recuperati nel processo di gassificazione (utilizzato per l'abbattimento dell'umidità del prodotto da reimmettere nel processo),
- Produzione oraria: 60 Kg,
- Umidità massima del prodotto da essiccare: 50%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10%.

Essiccatore Intesa machinery – [www.intesamachinery.com](http://www.intesamachinery.com)

- Produttore: Intesa machinery sas, Lonato del Garda (BS),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore può essere alimentato con bruciatori a metano, cippato, pellet ecc. Nel caso di alimentazione a biomassa il suo contenuto di umidità non deve essere superiore al 45%. Sono disponibili bruciatori a griglia fissa o mobile,
- Produzione oraria: 200 – 10.000 Kg a seconda dei modelli
- Umidità massima del prodotto in entrata: 50%
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10%.

Essiccatore Manfredini & Schianchi – [www.manfredinieschianchi.com](http://www.manfredinieschianchi.com)

- Produttore: Manfredini & Schianchi, Sassuolo (MO),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore opera in controcorrente e può essere alimentato con bruciatori a gas, bruciatori a biomasse oppure in cogenerazione (convogliando i fumi di scarico),
- Produzione oraria: 10.000 – 60.000 Kg a seconda dei modelli
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore Dorset Belt dryer "Tomo" – [www.dorset.nu/it](http://www.dorset.nu/it)

- Produttore: Dorsetgroup, Aalten, Paesi Bassi,
- Tipologia di essiccatore: a tappeto,
- Caratteristiche: l'essiccatore viene alimentato con il calore residuo di impianti a biogas. L'aria di processo ha una temperatura generalmente non superiore a 90°C,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore Godioli & Bellanti – [www.godioliebellanti.com](http://www.godioliebellanti.com)

- Produttore: Godioli & Bellanti, Città di Castello (PG),
- Tipologia di essiccatore: tappeto o tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore può essere alimentato con bruciatore a combustibile fossile o a biomassa, oppure in cogenerazione impiegando scambiatori di calore ad acqua calda, olio diatermico o a vapore,
- Produzione oraria: 4.000 kg massimo,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore 1T BT "Scolari" – [www.scolarisrl.com](http://www.scolarisrl.com)

- Produttore: Scolari, Paderno Franciacorta (BS),
- Tipologia di essiccatore: a tappeto (1, 2 o 3 elementi sovrapposti),
- Caratteristiche: l'essiccatore può essere alimentato con bruciatori a combustibili tradizionali, a gas, biomasse oppure in cogenerazione (recupero dei fumi caldi). L'aria di processo ha una temperatura variabile tra 45 e 140° C,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore P150 e P250 - [//essiccatorepellet.altervista.org/essiccatori-rotativi-segatura-pellet.html](http://essiccatorepellet.altervista.org/essiccatori-rotativi-segatura-pellet.html)

- Produttore: Allwood di Varesi Fabio, Arena Po (PV),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore è alimentato da un bruciatore a pellet da 100 kW con un consumo orario di 15-20 kg
- Produzione oraria: 150 kg (mod. P150), 250 kg (mod. P250),
- Umidità massima del prodotto in entrata: 40-50%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore L250 - [//essiccatorepellet.altervista.org/essiccatori-rotativi-segatura-pellet.html](http://essiccatorepellet.altervista.org/essiccatori-rotativi-segatura-pellet.html)

- Produttore: Allwood di Varesi Fabio, Arena Po (PV)
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore è alimentato da un bruciatore a legna (20% di umidità massima) con un consumo orario di 20-30 kg,
- Produzione oraria: 250 kg,
- Umidità massima del prodotto in entrata: 40-50%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore DSD (vari modelli in base alla capacità evaporativa) – [www.officine-parenti.it](http://www.officine-parenti.it)

- Produttore: Parenti srl Costruzioni Meccaniche, Ariano nel Polesine Piano (RO),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: non definite,
- Produzione oraria: da 1000 kg (mod. DSD 600) a 50,000 kg (mod. DSD 30000),
- Umidità massima del prodotto in entrata: 60-80%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 4%.

Essiccatore EPG (vari modelli) – [www.pezzolato.it](http://www.pezzolato.it)

- Produttore: Pezzolato – Officine Costruzioni Meccaniche, Envie (CN),
- Tipologia di essiccatore: non definita,
- Caratteristiche: il processo utilizza aria calda prodotta dallo scambio di calore tra l'aria esterna prelevata da un ventilatore e l'acqua calda proveniente dal motore di cogenerazione. Il grado di umidità viene regolato da un apposito software. L'aria di processo ha una temperatura di circa 80 °C, Vengono impiegati 45 – 180 kW termici in funzione del modello
- Produzione oraria: da 50 kg (mod. EPG 50) a 200 kg (mod. EPG 200),
- Umidità massima del prodotto in entrata: 45%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore mod. Delta – [www.giampimacchineagricole.com](http://www.giampimacchineagricole.com)

- Produttore: Giampi srl, Carbognano (VT),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore è alimentato da un bruciatore a biomassa. Temperatura dell'aria di processo compresa tra 20° e 90 °C in funzione del prodotto da essiccare (frutta in guscio, cippato ecc),
- Produzione oraria: non definita
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore Climair50 – [www.climair50.com](http://www.climair50.com)

- Produttore: Climair50 srl, Santa Giustina in Colle (PD),
- Tipologia di essiccatore: sistema a container con coclea di movimentazione e rastrello di espulsione,
- Caratteristiche: l'essiccatoio può essere alimentato con acqua calda proveniente da impianto di cogenerazione, gassificatore, caldaie a biomassa,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore HR-40 – [www.resch-3.com](http://www.resch-3.com)

- Produttore: Resch-3, Prato Isarco (BZ),
- Tipologia di essiccatore: non definita,
- Caratteristiche: potenza termica assorbita 120 kW, potenza elettrica assorbita 6 kW, temperatura dell'acqua 60 – 90 °C,
- Produzione oraria: 1,2 – 2 mc (300-400 kg),
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: ≥ 5%.

Essiccatore DD – [www.errepiengineering.it](http://www.errepiengineering.it)

- Produttore: RP Engineering, Soresina (CR),
- Tipologia di essiccatore: tamburo rotativo,
- Caratteristiche: l'essiccatore viene alimentato da bruciatori a metano, gpl, cippato, pellet biomassa, Potenze termiche installate da 250 a 3000 kW, potenze elettriche installate da 15 a 80 kW,
- Produzione oraria: 400-4000 kg,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore flash FLR- [www.errepiengineering.it](http://www.errepiengineering.it)

- Produttore: RP Engineering, Soresina (CR),
- Tipologia di essiccatore: non definita,
- Caratteristiche: l'essiccatore viene alimentato da bruciatori a metano, gpl, cippato, pellet legno. Potenze termiche installate da 50 a 400 kW,
- Produzione oraria: 100-500 kg,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore L-Enz (vari modelli) – [www.lauber-holztrockner.de](http://www.lauber-holztrockner.de)

- Produttore: Lauber trocknungstechnik, Alfdorf (Germania),
- Tipologia di essiccatore: container mobile da 30 – 40 mc con sistema di aerazione a pavimento,
- Caratteristiche: l'essiccatore sfrutta il calore residuo di impianti a biogas, gassificatori, impianti di cogenerazione, centrali di teleriscaldamento a cippato. Potenze elettriche installate da 3 a 45 kW (rispettivamente per i modelli L-Enz 80 e L-Enz 1000), potenze termiche da 80 a 1000 kW (rispettivamente per i modelli L-Enz 80 e L-Enz 1000),
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: non definita,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: non definita.

Essiccatore TSJ-800 (per segatura) – [www.pellettatrice.com/it/essiccatori-segatura-/33-essiccatore-segatura-produzione-pellet.html](http://www.pellettatrice.com/it/essiccatori-segatura-/33-essiccatore-segatura-produzione-pellet.html)

- Produttore: Novatech srl, Aulla (MS),
- Tipologia di essiccatore: non definito,
- Caratteristiche: non definite,
- Produzione oraria: 500-700 kg,
- Umidità massima del prodotto in entrata: 50-60%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10-15%.

Essiccatore Mecmargroup – [www.mecmargroup.com](http://www.mecmargroup.com)

- Produttore: Mecmar Spa, Minerbe (VR)
- Tipologia di essiccatore: cilindro verticale da 27 mc derivato da essiccatoi per foraggio,
- Caratteristiche: l'essiccatore viene alimentato con aria calda ottenuta sfruttando il calore residuo di una centrale a biomassa (scambio termico attraverso tubi in cui scorre acqua calda. La macchina opera a ciclo discontinuo: carico, essiccamento, scarico,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: 40-50%,
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 15-18%.

Essiccatore T-500 – [www.lfmsrl.com](http://www.lfmsrl.com)

- Produttore: LFM srl, Pegognaga (MN),
- Tipologia di essiccatore: Cilindro rotativo,
- Caratteristiche: cilindro rotativo (diametro 0,5 m, lunghezza 6 m), può essere equipaggiato con bruciatori a gasolio, metano, gpl, olio, biomasse, oppure sfruttare il calore residuo di impianti di cogenerazione. Consumo elettrico 10 kWh, consumo di metano 24,4 mc/h, consumo di biomassa 55 kg s.s./h. Potenza termica 200.000 kcal/h (1.000 kcal/h per evaporare 1 kg di acqua). Velocità aria 5,5 m/s a 285 °C,
- Produzione oraria: 360 – 1.800 kg in funzione dell'umidità di partenza (20-60%),
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10%.

#### Essiccatore ad infrarossi - //shop.viteconica.com

- Produttore: Manutenzioni Meccaniche Vilminore di Andreoletti Carmela, Vilminore di Scalve (BG),
- Tipologia di essiccatore: lampade ad infrarosso,
- Caratteristiche: consumo elettrico 10-11 kWh,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: 20%
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10%.

#### Essiccatore ad infrarossi – [www.bianco-line.it](http://www.bianco-line.it)

- Rivenditore: Bianco-line, Villar San Costanzo (CN),
- Tipologia di essiccatore: lampade ad infrarosso,
- Caratteristiche: consumo elettrico 19 kWh,
- Produzione oraria: non definita,
- Umidità massima del prodotto in entrata: 20%
- Umidità del prodotto dopo il processo di essiccazione: 10%.

---

## BIBLIOGRAFIA

---

1. Huang Y., Finell M., Larsson S., Wang X., Zhang J., Wei R., Liu L. 2017. Biofuel pellets made at low moisture content e Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass Bioenergy*, 98, 8–14.
2. Picchio R., Spina R., Sirna A., Lo Monaco A., Civitarese V., Del Giudice A., Suardi A., Pari L. 2012. Characterization of Woodchips for Energy from Forestry and Agroforestry Production. *Energies*, 5, 3803–3816.
3. IPCC Climate Change, Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK, Available online: [https://www.researchgate.net/publication/262260453\\_IPCC\\_2007\\_Climate\\_Change\\_2007\\_Synthesis\\_Report\\_Contribution\\_of\\_Working\\_Groups\\_I\\_II\\_III\\_to\\_the\\_Fourth\\_Assessment\\_Report\\_of\\_the\\_Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change\\_Geneva](https://www.researchgate.net/publication/262260453_IPCC_2007_Climate_Change_2007_Synthesis_Report_Contribution_of_Working_Groups_I_II_III_to_the_Fourth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_Geneva) (accessed on 6 February 2019).
4. Tumuluru J.S. 2014. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosyst. Eng.*, 119, 44–57.
5. Tumuluru J.S., Wright C.T., Hess J.R., Kenney K.L. 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefining*, 5, 683–707.
6. Sánchez J., Curt M.D., Sanz M., Fernández J. 2015. A proposal for pellet production from residual woody biomass in the island of Majorca (Spain). *AIMS Energy*, 3, 480–504.
7. Agriforenergy. Energia rinnovabile dall'agricoltura e dalle foreste. *Mercati & prezzi*. Anno XVI n. 3/Ottobre 2020
8. <https://www.biomassapp.it/blog>.
9. Gravelins A., Muižniece I., Blumberga A., Blumberga D. 2017. Economic sustainability of pellet production in Latvia. *Energy Procedia*, 142, 531–537.
10. GSE (Energy Services Manager), Rapporto Delle Attività, Energia in Movimento, Available online: [https://www.gse.it/documenti\\_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20delle%20attivit%C3%A0/GSE\\_RA2017.pdf](https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20delle%20attivit%C3%A0/GSE_RA2017.pdf) (accessed on 5 March 2019).
11. Haruna N.Y., Afzalb M.T. 2016. Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Eng.*, 148, 93–99.

12. Supin M. 2015. Wood Processing and Furniture Manufacturing Challenges on the World Market: Wood Pellet Global Market Development, pp, 255–260, Available online: [https://www.researchgate.net/publication/286443751\\_Wood\\_Pellet\\_Global\\_Market\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/286443751_Wood_Pellet_Global_Market_Development) (accessed on 7 February 2019).
13. Acda M.N., Jara A.A., Daracan V.C., Devera E.E. 2016. Opportunities and Barriers to Wood Pellet Trade in the Philippines. *Ecosyst. Dev. Journal*, 6, 27–31. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/303680604\\_Opportunities\\_and\\_barriers\\_to\\_wood\\_pellet\\_trade\\_in\\_the\\_Philippines](https://www.researchgate.net/publication/303680604_Opportunities_and_barriers_to_wood_pellet_trade_in_the_Philippines) (accessed on 7 February 2019).
14. European Biomass Association (AEBIOM) Bioenergy, A Local and Renewable Solution for Energy Security, Available online: <https://www.slideshare.net/AEBIOM2/biomass> (accessed on 8 January 2019).
15. Verhoest C, Ryckmans Y. Industrial Wood Pellets Report, Available online: [http://www.bpa-intl.com/images/stories/present-1/PELLCERT%20-%20Industrial%20Wood%20Pellets%20Report%20\(2012\).pdf](http://www.bpa-intl.com/images/stories/present-1/PELLCERT%20-%20Industrial%20Wood%20Pellets%20Report%20(2012).pdf) (accessed on 5 March 2019).
16. GSE (Energy Services Manager), Rapporto Statistico, Energia Da Fonti Rinnovabili, Available online: [https://www.gse.it/documenti\\_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20statistico%20GSE%20-%202016.pdf](https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20statistico%20GSE%20-%202016.pdf) (accessed on 5 March 2019).
17. Whittaker C., Shield I. 2017. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 71, 1–11.
18. Karkania V., Fanara E., Zabaniotou A. 2012. Review of sustainable biomass pellets production—A study for agricultural residues pellets’ market in Greece. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16, 1426–1436.
19. Di Candilo M., Facciotto G. 2012. Colture da biomassa ad uso energetico Potenzialità e prospettive, In: Progetti di ricerca SUSCACE e FAESI, Recenti acquisizioni scientifiche per le colture energetiche, Supplemento n, 2 a Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi n, 183: 10-19.
20. 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 (4): 1524-1532.
21. Civitarese V., Faugno S., Pindozi S., Assirelli A., Pari L. 2015. Effect of short rotation coppice plantation on the performance and chips quality of a self-propelled harvester. *Biosyst. Eng.*, 129: 70-377.
22. Di Matteo G., Sperandio G., Verani S. 2012. Field performance of three Poplar clones in Short Rotation Forestry of Central Italy. *iForest, Biogeosciences and Forestry*, Vol, 5: 224-229, Publ, on-line: <http://www.sisef.it/iforest/pdf/?id=ifor0628-005>.



23. 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, 2005: 320-323.
24. Facciotto G. 2012. Colture da biomassa ad uso energetico Potenzialità e prospettive, In: Progetti di ricerca SUSCACE e FAESI, Recenti acquisizioni scientifiche per le colture energetiche, Supplemento n, 2 a Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi n, 183: 26-30, ISSN 1590-7805.
25. Coaloa D. 2011 - Cedui a rapido accrescimento settore in rapida (de)crescita? *Agroforenergy* 3/11: 38-41
26. Sperandio G., Acampora A., Del Giudice A., Civitarese V. 2021. Models for the Evaluation of Productivity and Costs of Mechanized Felling on Poplar Short Rotation Coppice in Italy. *Forests*, 2021, 12: 954. <https://doi.org/10.3390/f12070954>.
27. Cadei A., Mologni O., Röser D., Cavalli R., Grigolato S. 2020. Forwarder Productivity in Salvage Logging Operations in Difficult Terrain. *Forests*, 2020, 11, 14. <https://doi.org/10.3390/F11030341>.
28. Romero-García J.M., Niño L., Martínez-Patiño C., Álvarez C., Castro E., Negro M.J. 2014. Biorefinery based on olive biomass, State of the art and future trends. *Bioresource Technology*, 159: 421–432.
29. Di Giacinto S., Longo L., Menghini G., Delfanti L.M.P., Egidì G., De Benedictis L., Riccioni S., Salvati L. 2014. A model for estimating pruned biomass obtained from *Corylus avellana* L. *Applied Mathematical Sciences*, 8: 6555-6564.
30. Gli scarti di potatura del verde urbano valgono 120 milioni di euro - [Corriere.it](http://Corriere.it).
31. <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agricoltura-economia-politica/2021/12/07/verde-pubblico-e-manutenzione-la-gestione-dei-rifiuti/73435>.
32. Mitchell C.P., Kofman P.D., Angus-Hankin C.M. 1997. Guidelines for conducting harvesting trials in short rotation forestry, Aberdeen University, Forestry Research Paper 1:1-50.
33. EN ISO 17225 – 2: Solid Biofuels – Fuel specifications and classes – part 2: Graded wood pellets.
34. EN ISO 18134-1, Solid Biofuels—Determination of Moisture Content—Oven Dry Method; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
35. EN ISO 18122, Solid Biofuels—Determination of Ash Content; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
36. CEN/TS 15370-1, Solid Biofuels—Method for the Determination of Ash Melting Behaviour, Part 1: Characteristic Temperatures Method; CEN/TS: Geneva, Switzerland, 2006.
37. EN ISO 18125, Solid Biofuels—Determination of Heating Value; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
38. EN ISO 16948, Solid Biofuels—Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.

39. EN ISO 16994, Solid Biofuels—Determination of Total Content of Sulfur and Chlorine; ISO: Geneva, Switzerland, 2016.
40. EN ISO 16968, Solid Biofuels—Determination of Minor Elements; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
41. EN ISO 17828, Solid Biofuels—Determination of Massa volumica apparente; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
42. EN ISO 17829, Solid Biofuels—Determination of Length and Diameter of Pellets; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
43. EN ISO 17831–1, Solid Biofuels—Determination of Mechanical Durability of Pellets and Briquettes, Part 1: Pellets; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
44. Telmo C., Lousada J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy* 2011, 35, 2634–2639.
45. Toscano G., Riva G., Pedretti E.F., Corinaldesi F., Mengarelli C., Duca D. 2013. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. *Biomass and Bioenergy*, 56, 317–322.
46. Monedero E., Portero H., Lapuerta, M. 2015. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. *Fuel Process. Technol.*, 132, 15–23.
47. Kovacs H., Szemmelveisz K. 2016. Heavy metal contaminated biomass combustion as treatment after phytoremediation—A review. *Mater. Sci. Eng.*, 41, 69–78.
48. Ružinská E., Štollmann V., Hagara V., Jabłonski M. 2015. Analysis of selected heavy metals in biomass for preparation of biofuels—Part I, Toxicological effects of heavy metals, *Ann, Wars, Univ, Life Sci, SGGW. For. Wood Technol.*, 92, 383–389.
49. Obernberger I., Theka G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their Combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*, 27, 653–669.
50. Barontini M., Scarfone A., Spinelli R., Gallucci F., Santangelo E., Acampora A., Jirjis R., Civitarese V., Pari L. 2014. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and Bioenergy*, 67: 17-25. ISSN: 0961-9534. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.022>

