



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

## Analisi del contenuto di radionuclidi nel cippato prodotto in alcune zone della provincia di Trento

**Relatore**

Prof. Raffaele Cavalli

**Correlatori**

Dott.ssa Rosa Greco

Dott.ssa Chiara Cantaluppi

**Laureando**

Nicolò Pradel

**Matricola**

2023303

Anno Accademico 2021-2022



# INDICE

<b>1</b>	<b>RIASSUNTO .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>9</b>
4.1	Definizione di biomassa.....	11
4.2	Impiego e produzione di cippato in provincia di Trento.....	12
4.3	La problematica della radioattività nelle biomasse legnose.....	18
4.4	I principali radionuclidi .....	27
4.5	L'incidente di Chernobyl.....	30
<b>5</b>	<b>OBIETTIVI .....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>MATERIALI E METODI.....</b>	<b>35</b>
6.1	Inquadramento del territorio oggetto di studio .....	35
6.2	Raccolta, caratteristiche e trattamento dei campioni .....	37
6.2.1	Caratteristiche dei campioni .....	38
6.2.2	Produzione del pellet .....	40
6.3	Analisi qualitative del cippato .....	47
6.3.1	Contenuto idrico .....	48
6.3.2	Potere calorifico.....	50
6.3.3	Contenuto ceneri.....	53
6.3.4	Fusibilità ceneri .....	54
6.4	Analisi radioattività.....	55
6.5	Elaborazione statistica .....	59
6.6	Interpolazione IDW .....	61
<b>7</b>	<b>RISULTATI E DISCUSSIONE.....</b>	<b>62</b>
7.1	Riassunto dei risultati ottenuti attraverso le analisi qualitative del cippato .....	62
7.1.1	Contenuto idrico .....	62
7.1.2	Potere calorifico.....	63
7.1.3	Contenuto in ceneri.....	65
7.1.4	Fusibilità delle ceneri .....	66
7.2	Analisi statistica dei risultati di laboratorio .....	67

7.2.1	Contenuto idrico .....	67
7.2.2	Potere calorifico.....	69
7.2.3	Contenuto di ceneri.....	71
7.2.4	Fusibilità delle ceneri .....	85
7.3	Analisi statistica sui contenuti di Cs-137.....	87
7.4	Discussione dei risultati.....	91
7.4.1	Distribuzione territoriale .....	91
7.4.2	Analisi dei risultati e confronto con la letteratura esistente.....	94
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>102</b>

## **RINGRAZIAMENTI**

*Doveroso dedicare uno spazio a chi ha maggiormente contribuito al completamento di questo percorso durato cinque anni.*

*Ai miei genitori, Silvano e Micaela, i quali sono sempre stati presenti nel momento del bisogno e non hanno mai smesso di credere in me.*

*A mia sorella Ilaria, che con la sua sagacia mi ha sempre aiutato nei momenti di difficoltà.*

*A Simone per essere diventato parte importante della famiglia.*

*Ai miei nonni, in particolare alla nonna Franca, che più di tutti ha contribuito alla realizzazione di questo traguardo a suon di preghiere e di candele.*

*Ai miei amici d'infanzia, ai miei amici delle superiori, ai miei amici dell'università e agli amici persi durante la strada. A voi devo la leggerezza con cui ho potuto affrontare questo percorso ma più in generale la vita. Grazie a chi c'è stato, chi c'è e chi ci sarà.*

*Ai miei colleghi e datori di lavoro che mi hanno permesso di affrontare i periodi di studio in assoluta leggerezza e tranquillità.*

*Sperando di non aver escluso nessuno, ci tengo a ringraziare nuovamente tutti quelli che hanno fatto parte di questo percorso, anche se solo in minima parte. Grazie a voi tutti!*

*Spero di avervi reso orgogliosi e fieri di me.*

*Che sia l'inizio di una lunga e prosperosa carriera professionale.*

## 1 RIASSUNTO

La contaminazione da radiocesio (Cs-137) nelle biomasse legnose è un problema segnalato a partire dal 2009. La presente tesi è volta a evidenziare l'eventuale problema relativo alla radioattività delle biomasse legnose, in particolare alla gestione del sottoprodotto di scarto, ovvero le ceneri, materiale nel quale sembrano concentrarsi maggiormente i radionuclidi.

Come si evince dal titolo, l'area di studio indirizzata al perseguimento dell'obiettivo è la provincia di Trento, territorio caratterizzato da un paesaggio prevalentemente boschivo e sede importante di produzione di biomasse legnose, in particolare di cippato.

Il cippato prodotto alimenta differenti centrali a biomassa anche al di fuori del confine provinciale. Assunto da letteratura il fatto che i radionuclidi, tra cui il Cs-137, si concentrano maggiormente nelle ceneri, è importante indirizzare gli operanti del settore verso una maggior attenzione nella gestione e smaltimento delle stesse.

Attraverso un campionamento circoscritto e ben distribuito all'interno della provincia di Trento sono prelevati 27 campioni di cippato distribuiti omogeneamente all'interno dei 9 Distretti Forestali che dividono la provincia di Trento.

I campioni, dai quali viene prodotto e incenerito il pellet, sono analizzati qualitativamente presso il laboratorio Analisi Biocombustibili e successivamente analizzati per quanto concerne la radioattività presso il laboratorio CNR-ICMATE dove è rilevata la presenza di Cs-137 nei 27 campioni di cenere e in tre campioni di cippato tal quale.

I risultati evidenziano il modesto ma diffuso contenuto di Cs-137 nelle ceneri di cippato forestale proveniente dalla provincia di Trento, in linea con altre aree forestali europee.

Rappresenta però un problema l'eventuale accumulo legato agli impianti a biomassa, motivo per il quale l'indagine è rivolta soprattutto a indirizzare verso un corretto trattamento delle ceneri e inoltre a perseguire l'obiettivo di informare ed evidenziare ulteriormente il problema al fine di porre un limite effettivo di tollerabilità ad oggi inesistente, creando così una filiera energetica pulita e sicura, abbandonando gradualmente l'impiego dei combustibili fossili.

## 2 ABSTRACT

Radiocaesium (Cs-137) contamination in woody biomass is a reported problem since 2009. The present thesis aims to highlight the possible problem related to the radioactivity of woody biomass, in particular to the management of the waste by-product, that is ashes, a material in which radionuclides seem to be concentrated more.

As can be seen from the title, the area of study directed to the pursuit of the purpose is the province of Trento, a territory characterized by a predominantly wooded landscape and an important location for the production of woody biomass, in particular wood chips. The wood chips produced feed different biomass plants even outside the provincial border. Taken from literature the fact that radionuclides, including Cesium-137, are more concentrated in ashes, it is important to direct the operators of the sector towards a greater attention in the management and disposal of the same.

Through a circumscribed and well distributed sampling within the province of Trento are taken 27 samples of wood chips distributed homogeneously within the 9 Forest Districts that divide the province of Trento.

The samples, from which the pellets are produced and incinerated, are qualitatively analyzed at the Biofuel Analysis laboratory and then analyzed for radioactivity at the CNR-ICMATE laboratory where the presence of Cs-137 in the 27 ash samples and in three wood chip samples as such.

The results show the modest but widespread content of Cs-137 in forest ash from the province of Trento, in line with other European forest areas.

However, a problem is the possible accumulation linked to biomass plants, this is why the investigation is mainly aimed at directing towards a correct treatment of ashes and also at pursuing the objective of informing and further highlighting the problem in order to put an effective limit of tolerability that not existing today and creating a clean and safe energy supply chain, gradually abandoning the use of fossil fuels.

### 3 INTRODUZIONE

Il recente aumento dei costi energetici e il crescente interesse per le energie rinnovabili stanno favorendo l'utilizzazione delle biomasse legnose come fonte energetica. Benché tale approccio possa essere vantaggioso dal punto di vista del bilancio di CO<sub>2</sub>, la produzione di energia mediante combustione biomassa legnosa non è sempre un processo ottimale dal punto di vista dell'impatto ambientale (Scalet, 2008).

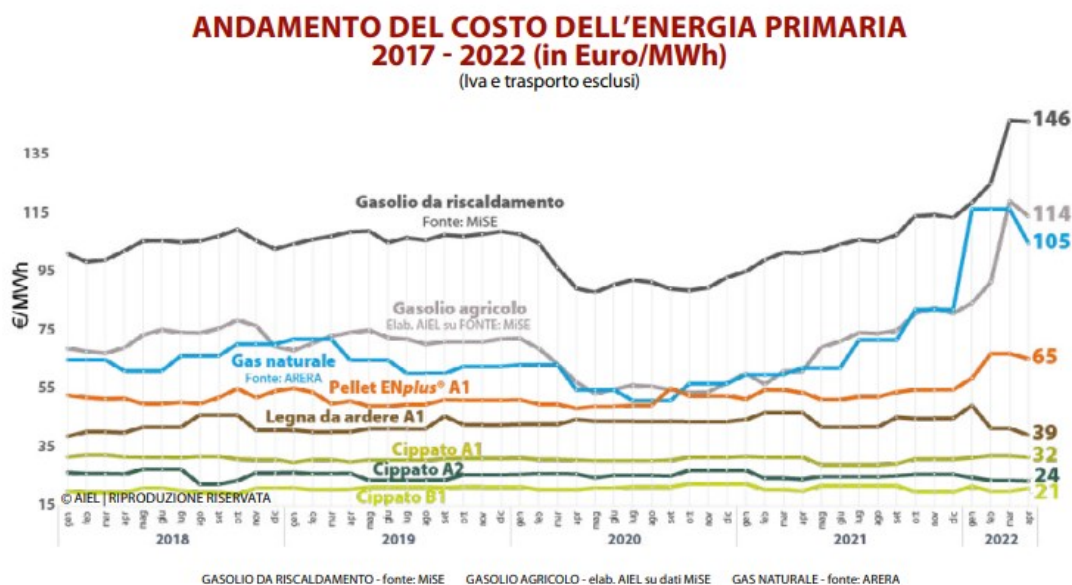


Figura 3.1: Andamento del costo dell'energia (AIEL, 2022)

La necessità di cambiamenti nel settore energetico, oltre a motivazioni di carattere economico, è sostenuta da due principali motivazioni, ovvero l'esauribilità delle fonti fossili e soprattutto dell'inquinamento atmosferico provocato dalla combustione di combustibili fossili.

I combustibili legnosi possono efficacemente sostituire i combustibili fossili ed è infatti ormai diventato di uso comune l'utilizzo di biomasse di diversa natura per produrre energia e/o calore attraverso la combustione delle stesse.

Secondo l'ultimo WEO (World Energy Outlook,) redatto dall'International Energy Agency (IEA, 2020), entro il 2040 la domanda energetica globale subirà un aumento del 30%, aumento legato soprattutto alla più consistente richiesta dei paesi in via di sviluppo. Attualmente il contributo dei combustibili fossili risulta predominante nella produzione globale di energia e continuerà a salire per tutto il prossimo ventennio (Chiabrando, 2018).



L'IEA prevede che oltre ad aumentare il consumo di gas naturale al contempo crescerà il ruolo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) che secondo le stime dovrebbero arrivare a coprire il 40% dell'incremento energetico mondiale citato precedentemente. Le FER saranno nel prossimo futuro oggetto di importanti investimenti economici e circa due terzi di questi saranno rivolti allo sviluppo del settore delle energie rinnovabili (WEO, 2017). L'Italia da questo punto di vista è sempre stata all'avanguardia; infatti, già nel 2016 il 17,5% dell'energia prodotta internamente proveniva da fonti rinnovabili arrivando a rispettare quanto previsto dal programma 20-20-20 che prevedeva di portare la quota di energia prodotta da rinnovabili al 20% entro il 2020 (GSE, 2017).

Tuttavia, le energie da fonti rinnovabili sono spesso al centro di discussioni, polemiche e contestazioni in quanto risulta di difficile valutazione la diffusione di piccoli impianti e il relativo impatto economico, sociale, ambientale e di salute pubblica.

Recentemente, infatti, valutazioni formulate dall'AIE e da altri organismi hanno dimostrato che sarà necessaria un'ampia gamma di soluzioni e tecnologie sostenibili per affrontare questa transizione verso un approvvigionamento energetico pulito, sicuro e competitivo nei confronti delle attuali fonti energetiche fossili.

Una delle soluzioni energetiche che più ha preso campo in Trentino negli ultimi anni è lo sfruttamento di biomasse solide legnose, in particolare cippato, per produrre energia elettrica e termica in impianti cogenerativi o altre tipologie di impianti quali centrali di teleriscaldamento.

Le biomasse legnose sono una delle fonti di energia rinnovabile più tormentata, specie per quanto riguarda l'emissione di inquinanti e nello specifico di polveri sottili, IPA e diossine, metalli pesanti e altri inquinanti (Livi, 2014).

Spesso, infatti gli impianti vengono associati alla produzione di IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e diossine oppure all'emissione di metalli pesanti, ma è altresì dimostrato che negli impianti di gassificazione, nei quali è prodotto syngas mediante una combustione in difetto di ossigeno, questo non avvenga.

Per quanto riguarda invece gli impianti dove avviene una completa combustione della biomassa, quali impianti di teleriscaldamento o centrali cogenerative la combustione comporta la produzione di ceneri, in particolare di ceneri pesanti.

Il quantitativo di ceneri prodotte è legato soprattutto alla specie legnosa e alle caratteristiche del legno da cui è prodotta la biomassa, in particolare la presenza di corteccia o residui di terreno influenzano notevolmente il contenuto di ceneri.

Il processo di combustione produce all'interno delle ceneri la concentrazione di sostanze incombustibili; si pone dunque l'interrogativo se alcune di queste sostanze incombuste possano essere dannose per l'ambiente o nel caso peggiore per la salute umana.

A seguito dell'incidente di Chernobyl nel 1986 le biomasse provenienti da zone interessate dal passaggio della nube radioattiva potrebbero contenere, infatti, sostanze radioattive, in particolare cesio<sup>137</sup>. La quantità che generalmente è modesta si rivela tuttavia non trascurabile all'interno delle ceneri cumulate nei grandi impianti a biomassa (Zambelli et al., 2019).

Il presente lavoro, si pone dunque l'obiettivo di analizzare l'eventuale contenuto di sostanze inquinanti, metalli pesanti e soprattutto radionuclidi. Il territorio del Trentino, essendo caratterizzato da un paesaggio forestale notevole è emblematico e sede autorevole per quanto riguarda la produzione di biomasse legnose e in particolare di cippato che viene principalmente auto consumato all'interno di impianti rivolti alla produzione di energia termica ed energia elettrica, si pone di conseguenza il problema dello smaltimento delle ceneri qualora effettivamente contengano sostanze che potrebbero rivelarsi dannose per l'ambiente o per l'uomo.

Dapprima attraverso un campionamento circoscritto al territorio del Trentino e successivamente tramite analisi di laboratorio il lavoro propone di investigare l'eventuale contenuto di radionuclidi, nello specifico di Cs-137, all'interno del cippato prodotto in provincia autonoma di Trento.

## 4 STATO DELL'ARTE

Negli ultimi anni, la politica energetica dell'Unione Europea (UE) ha dato un notevole impulso all'impiego delle biomasse legnose per finalità energetiche al fine di ridurre la dipendenza dei paesi membri dall'uso di biocombustibili fossili e così contenere le emissioni di gas serra in atmosfera (Pieratti et al., 2019).

I biocombustibili legnosi derivanti dagli ecosistemi forestali, quali legna da ardere, pellet e cippato sono spesso e volentieri motivo di accesi dibattiti, polemiche e contestazioni. Le ragioni che rendono i biocombustibili così discussi sono legate principalmente alle emissioni; infatti, non è ancora ben chiaro quali siano e in quali quantità vengano rilasciate.

Tra le diverse fonti rinnovabili di energia, le biomasse legnose risultano forse essere quelle più bersagliate in quanto gli impianti che le utilizzano sono paragonati, secondo i detrattori, a degli inceneritori ignorando gli innumerevoli vantaggi che derivano dall'utilizzo di questa tipologia di risorsa.

I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo delle biomasse legnose sono molteplici e riguardano ad esempio la parziale neutralità nei confronti delle emissioni di anidride carbonica; seppur il concetto della totale neutralità dei biocombustibili legnosi sia ormai superato visto che la CO<sub>2</sub> è rilasciata in tempi più rapidi rispetto al tempo necessario per la sua accumulazione, il bilancio rispetto ai combustibili fossili è senz'altro migliore. Altri vantaggi riguardano la rinnovabilità del legno e il conseguente mantenimento del territorio con abbattimenti selezionati, senza dimenticare il fatto che confrontando il ciclo produttivo delle altre fonti di energia non rinnovabili come il petrolio o altri combustibili fossili, quello delle biomasse legnose risulta essere sicuramente meno impattante sull'ambiente e sulla salute delle persone (Livi, 2014). Le biomasse, infatti, possono contribuire ad una decarbonizzazione dei consumi termici, in quanto diversi studi sostengono che a parità di calore utile prodotto le fonti fossili immettono in atmosfera una quantità di CO<sub>2</sub> equivalente dieci volte maggiore rispetto alla rinnovabile legno (Baldessari, 2022).

L'insufficiente divulgazione di dati scientifici spesso comporta la raccolta di informazioni da parte del cittadino con il fai da te, cercando informazioni su internet anziché dalle dovute fonti informative quali articoli scientifici, centri di ricerca o università. L'insufficiente informazione porta verso una comprensibile opposizione motivata

dall'ignoranza e da interessi privati ed economici. Così facendo il problema è solamente posticipato, lasciando l'incombenza alle generazioni future.

Ma quali sono le principali accuse che vengono mosse nei confronti degli impianti a biomasse?

Da una parte, come anticipato, entrano in gioco diversi aspetti economici, tra cui la quantità e la provenienza della materia prima, il traffico indotto e gli incentivi economici. Il prelievo di legname dai nostri boschi nell'ultimo decennio ha registrato valori medi di circa 8 milioni di m<sup>3</sup> annui che corrispondono a un prelievo del 25% dell'incremento annuo delle foreste; dunque, esiste un ampio margine di miglioramento per la creazione di una filiera nazionale legno energia andando ad aumentare considerevolmente il prelievo di legname e destinandone una quota maggiore alla produzione di biomasse. A sostegno di questa affermazione rientra anche il fatto che la legna, avendo una bassa densità energetica, rende il trasporto decisamente costoso e dunque non si deve temere l'importazione e nemmeno l'aumento del traffico indotto in quanto il trasporto della biomassa legnosa al di sopra di un certo limite chilometrico la rende non più economicamente conveniente. Anche se negli ultimi anni l'import di alcune tipologie di biomassa ha subito un incremento nell'importazione, soprattutto a carico del pellet.

Un'altra motivazione consiste nel fatto che alle volte si è giustamente portati a pensare che senza degli incentivi economici questa tipologia di impianti non potrebbe essere realizzata, cosa in realtà in parte vera; infatti, basti pensare agli incentivi legati al fotovoltaico, che hanno permesso di creare una filiera energetica che in Italia non esisteva e ad oggi il fotovoltaico si sostiene in autonomia, senza il bisogno di ulteriori incentivi.

L'attuale problema del rincaro dell'energia e delle conseguenti bollette insostenibili per le famiglie e per le imprese dipende dal fatto che circa il 60% dell'energia prodotta in Italia deriva da combustibili fossili (TERNA, 2021), i quali hanno subito negli anni un continuo rimaneggiamento al rialzo, arrivando a quadruplicare il prezzo nell'arco di circa 20 anni.

I prezzi dei prodotti energetici non rappresentano però realmente i costi che la collettività deve pagare per soddisfare il proprio fabbisogno energetico. Un'analisi completa dovrebbe infatti considerare anche le esternalità, ovvero i costi che non incidono direttamente sul prezzo della risorsa ma che comunque vengono pagati e ossia costi

sociali, ambientali, sanitari che vengono pagati sottoforma di inquinamento, sfruttamento dell'ambiente e del capitale umano.

<b>COSTO DELL'ENERGIA PRIMARIA</b>		<b>EMISSIONI DI CO<sub>2</sub> (in kg CO<sub>2eq</sub>/MWh)</b>	
<b>Aprile 2022 (in Euro/MWh)</b>		<b>DELL'ENERGIA PRIMARIA</b>	
<small>al consumatore finale, iva e tasse incluse, trasporto escluso</small>			
179	<	Gasolio da riscaldamento	> 326
139	<	Gasolio agricolo e per serre	> 326
124	<	Gas naturale	> 250
80	<	Pellet A1 ENplus® in sacchi da 15kg	> 29
88	<	Pellet A1 ENplus® in autobotte	> 29
51	<	Legna da ardere M20-25	> 25
34	<	Cippato A1 M35	> 26
23	<	Cippato B1 M50	> 26

© AIEL RIPRODUZIONE RISERVATA

**Figura 4.1:** Costo dell'energia primaria (AIEL, 2022)

Se da una parte è stato chiarito l'aspetto economico della necessità di implementare oggi l'utilizzo delle biomasse per l'approvvigionamento energetico nazionale, è comunque giusto interrogarsi più approfonditamente sulle emissioni derivanti dall'utilizzo delle biomasse. Gli impianti a legna vengono infatti associati alla produzione di IPA, diossine, polveri sottili e metalli pesanti; inoltre, è stato dimostrato da recenti studi, prendendo ad esempio quello condotto da Zambelli et al. 2018 che le biomasse possano contenere sostanze radioattive se prodotte da partite di legno derivanti da aree interessate da fenomeni di inquinamento radioattivo.

#### 4.1 DEFINIZIONE DI BIOMASSA

Il termine biomassa indica un materiale eterogeneo originato attraverso un processo di fotosintesi, l'etimologia stessa allude al fatto che si tratti di materiale organico finalizzato all'utilizzo energetico. La biomassa è un prodotto vegetale costituito da acqua, sostanza organica e inorganica. Il livello d'acqua varia in relazione alla biomassa considerata e in relazione alla stagionatura della biomassa stessa. Infatti, prendendo in considerazione il legno, esso ha mediamente un contenuto idrico compreso tra il 30-50% che scende fino al 20-30% con la stagionatura. Il contenuto idrico incide abbondantemente a livello energetico, infatti più acqua è contenuta nella biomassa più sarà l'energia che dovrà essere impiegata nell'evaporizzazione della stessa.

Per quanto riguarda la parte organica è noto che la biomassa possa essere costituita, con le dovute approssimazioni da una percentuale compresa tra il 40-45% da cellulosa, 15-25% emicellulosa e 25-35% da lignina ed estrattivi.

La sostanza inorganica, come vedremo di seguito, è la parte incombusta della biomassa, la quale si trasmuta in ceneri. All'interno delle ceneri sono presenti gli elementi minerali, che non contribuiscono in termini energetici che possono essere suddivisi in microelementi e macroelementi.

Le biomasse principali interessate dalla presente trattazione sono le biomasse legnose, in particolare il cippato forestale. In generale, le biomasse legnose subiscono un processo di trasformazione più o meno articolato a seconda della biomassa legnosa considerata.

Le principali forme in commercio per questa categoria di biomasse sono la legna da ardere, il cippato, il pellet e i bricchetti.

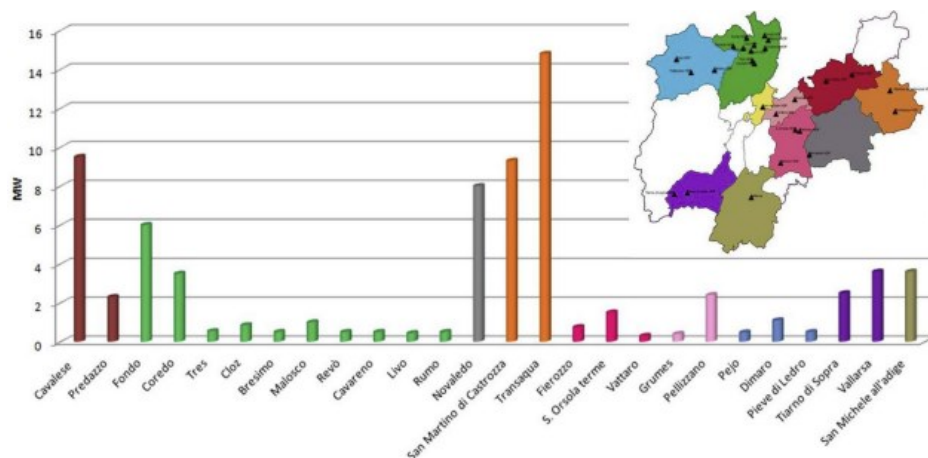
A livello nazionale la legna da ardere, nei suoi differenti assortimenti risulta essere il biocombustibile più utilizzato a fini energetici (Francescato, 2004), seguita dal cippato, dal pellet ed infine dai bricchetti.

#### **4.2 IMPIEGO E PRODUZIONE DI CIPPATO IN PROVINCIA DI TRENTO**

La provincia di Trento si estende per 621.200 ha e il settore forestale riveste un ruolo di fondamentale importanza vista la molteplicità di beni e servizi erogati dalla foresta.

Le biomasse legnose, quali pellet e cippato, rappresentano la principale fonte di energia rinnovabile della provincia di Trento e non solo; infatti, a livello europeo l'impiego di biomasse legnose copre il 48% dei consumi totali di rinnovabili e il 67% della bioenergia (Ylitalo et al., 2014; Masiero et al., 2014).

In provincia di Trento, risultano attivi 26 impianti di biomasse per una potenza globale installata di 72 MW.



**Figura 4.1:** Impianti a biomasse presenti in provincia di Trento suddivisi per comune e potenza installata (Pieratti et al., 2019)

È fondamentale riportare il fatto che il biocombustibile più impiegato ai fini termici ed elettrici risulta essere il cippato, il quale proviene dalla filiera corta e distinguibile in due categorie: filiera corta della prima lavorazione (cascami, scarti delle operazioni boschive e ramaglie) e filiera corta della seconda lavorazione (residui di segherie e sciaveri). A sostegno di quanto detto, in riferimento alla tipologia di materiale legnoso più impiegato prevale nettamente il cippato con l'86% degli impianti che impiegano tale biomassa. (Pieratti et al., 2019).

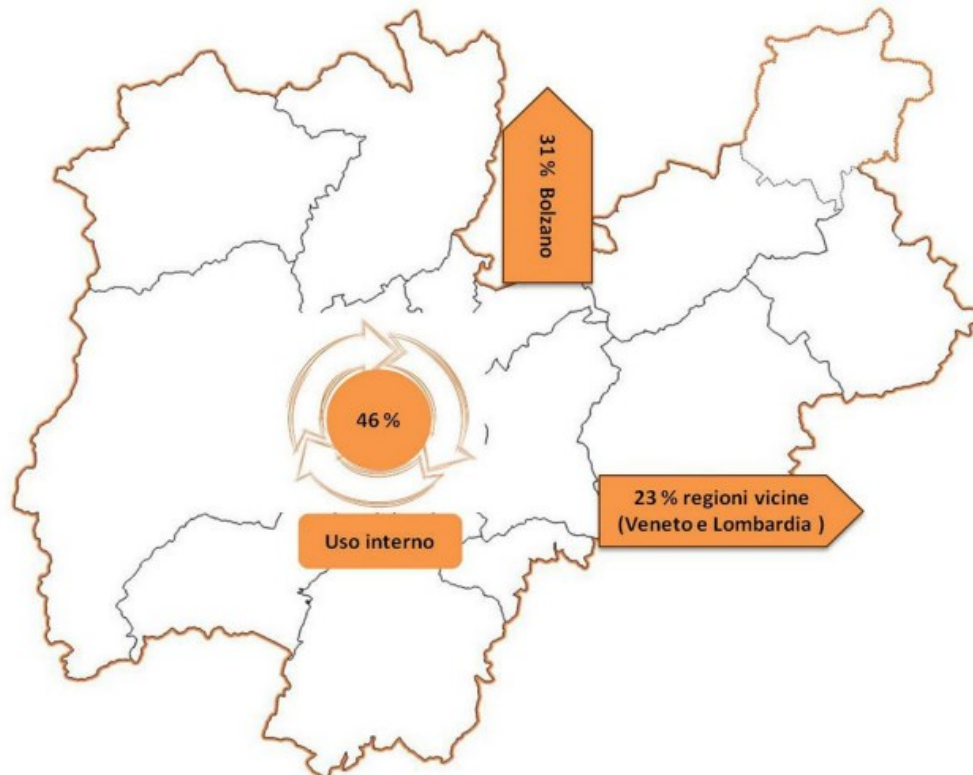
Da quanto emerso sul Piano Energetico Ambientale Provinciale (PEAP), si nota che, con riferimento ad indagini svolte nel biennio 2016-2017, annualmente in provincia di Trento, solamente a partire da imprese di prima trasformazione, vengono prodotti circa 700.000 m<sup>3</sup> di cippato forestale che sono commerciati con le seguenti destinazioni:

**Tabella 4.2:** Destinazione del cippato prodotto in provincia di Trento a partire da imprese di prima trasformazione

Destinazione	Cippato (m <sup>3</sup> )
In Provincia di Trento	322.000
In Provincia di Bolzano	217.000
Altre regioni d'Italia	161.000

(PEAP, 2021)

Ad oggi, la produzione di cippato ammonta a quasi un milione di metri steri all'anno a fronte di una domanda regionale di gran lunga inferiore. Infatti, come si evince dalla figura 4 parte consistente del cippato prodotto viene commerciata fuori provincia.



**Figura 1.3:** Destinazioni del cippato prodotto in Trentino (Pieratti et al., 2019)

La cippatura è una fase che ha acquisito una certa importanza negli ultimi anni allo scopo di sfruttare e valorizzare biomassa altrimenti inutilizzata e scartata.

A seguito della tempesta Vaia, la quantità di materiale recuperato ha comportato un incremento della biomassa inutilizzata e dunque destinata alla produzione di cippato. Inoltre, le recenti e diffuse pullulazioni di *Ips typographus* hanno incrementato ulteriormente l'aliquota destinata alla produzione di biomassa; infatti, l'attacco da parte di questo scoltide inficia le qualità tecnologiche del legno rendendolo non più idoneo alla trasformazione in assortimenti.

Il cippato è prodotto attraverso una macchina specificatamente progettata per ridurre il legno in scaglie; la cippatrice può essere montata su un autocarro o trainata da un trattore forestale. Il motore può essere autonomo o connesso direttamente al trattore tramite una presa di potenza.



Le macchine descritte sono generalmente classificate in base all'unità di cippatura montata in:

- Cippatrici a disco, l'unità di cippatura è costituita da un pesante volano su cui sono montati da due a quattro coltelli in posizione radiale. È presente, inoltre, una controlama la cui distanza può essere regolata per il dimensionamento delle scaglie.
- Cippatrici a tamburo, sono macchine più potenti e grandi rispetto alle cippatrici a disco. Possono lavorare sia topi interi che ramaglia. L'organo tagliente è costituito da un cilindro in acciaio su cui sono montati dei coltelli (fino a 12) in posizione tangenziale. Il materiale prodotto risulta essere più eterogeneo.
- Cippatrici a vite o coclea, l'organo di taglio è costituito in questo caso da una grande vite a sezione decrescente con i bordi taglienti che ruota su di un'asse orizzontale. Sono adatte a lavorare soprattutto tronchi interi.

Chiaramente, le cippatrici possono essere classificate anche in base alla potenza che è correlata direttamente alla produttività della macchina. Si parla allora di cippatrici di piccola potenza, media potenza o elevata potenza. Sulla cippatrice, di qualsiasi tipologia, può essere inoltre montato un vaglio in grado di raffinare il cippato ma al contempo abbassare la produttività.

Risulta utile precisare che esistono diverse tipologie di cippato, le quali sono classificabili in base all'origine, alla purezza del materiale di partenza (presenza di terra, quantità di aghi), al contenuto idrico, alle dimensioni, alla frazione fine ed altri parametri che vanno a determinare la categoria di appartenenza del cippato secondo specifica normativa, chiaramente la categoria determina la qualità tecnologica del prodotto. Tuttavia, possiamo distinguere sommariamente la produzione di cippato in due macrocategorie, ovvero:

- Cippato forestale, o verde, di qualità inferiore in quanto proveniente da scarti forestali di prima lavorazione quali cimali o ramaglie oppure da tronchi con difetti tecnologici, come la presenza di fori all'interno del legno (pullulazione da parte del bostrico tipografo – *Ips typographus*).
- Bianco, di qualità assolutamente superiore in quanto proveniente dall'operazione di cippatura di legname estremamente selezionato per la produzione del cippato oppure dai residui di prima lavorazione in segheria.

Come anticipato, la maggior parte del cippato prodotto è destinato alla combustione presso centrali termoelettriche a biomassa, ovvero impianti che trasformano in energia elettrica l'energia chimica del combustibile che la alimenta oppure presso centrali di teleriscaldamento.

Nello specifico, in una centrale a biomassa il combustibile di origine organica (in genere di derivazione legnosa) viene bruciato per produrre calore e riscaldare un fluido di lavoro che viene utilizzato direttamente come energia termica, oppure, dopo un cambio di stato (liquido-gassoso), per produrre energia meccanica ed azionare un generatore elettrico. Nel primo caso viene generata energia termica, e quindi la centrale è destinata al soddisfacimento termico di ambienti o comunità (teleriscaldamento). Nel secondo caso, utilizzando particolari tecnologie, è possibile generare contemporaneamente elettricità ed energia termica, si parla dunque di impianti di cogenerazione.

Al termine del processo di combustione sono presenti le ceneri, ovvero la parte inorganica che di conseguenza non brucia. Come indicazione di larga massima è possibile dire che il legno è costituito per il 99% da cellulosa, emicellulosa e lignina mentre il restante 1% è dato da componenti di origine minerale. Queste componenti minerali costituiscono la frazione principale delle ceneri (85-95%), la quota mancante (5-15%) è costituita da quelli che vengono definiti incombusti, ovvero materiale organico che ha subito solamente una parziale combustione. Il contenuto in ceneri è molto variabile in funzione della parte della pianta, della specie, delle condizioni del terreno e del deposito di metalli pesanti (Rocco, 2010).

**Tabella 4.2:** Contenuto di ceneri per tipo di legno (Vesterinen, 2003)

Tipo di legno	Contenuto di ceneri
	(% in peso su sostanza secca)
Legno vergine scortecciato	<1
Corteccia vergine	3-4
Corteccia contaminata	5-15
Legno di scarto vergine	0,5-3
Legno di scarto contaminato	1-3
Legno impregnato di sostanze organiche	0,5-2
Legno impregnato di sostanze inorganiche	2-5
Legno di scarto contaminato	0,5-19

**Tabella 4.3:** Contenuto in ceneri medio per tipologia di combustibile legnoso (Vesterinen, 2003)

<b>Combustibile legnoso</b>	<b>Contenuto di ceneri</b>
	(% in peso su sostanza secca)
Legna da ardere in tronchetti	1,2
Cippato d'albero (fusto, rami, aghi): abete	0,6
Cippato d'albero (fusto, rami, aghi): misto	0,5
Cippato di betulla	0,4-0,6
Cippato da residui forestali	1,3
Cippato da ceppi di albero	0,5
Segatura con corteccia	1,1
Segatura di abete senza corteccia	0,08
Trucioli da pialla	0,4
Corteccia di pino	1,7
Corteccia di abete	2,3-2,8
Corteccia di betulla	1,6

Una classica distinzione relativa alle ceneri è legata alla massa volumica e alla conseguente capacità di accumularsi sul fondo della camera di combustione o viceversa allontanarsi da quest'ultima sfruttando il flusso dei fumi di combustione. Sostanzialmente è possibile parlare di:

- Ceneri leggere, la cui massa volumica è 0,8-0,9 t/m<sup>3</sup> ed aumenta all'aumentare della percentuale di incombusto. Tendenzialmente, i metalli pesanti presenti nella biomassa si concentrano all'interno di questa tipologia di cenere. Tali ceneri sono generalmente trasportate dai fumi di combustione lungo la canna fumaria dell'impianto. Parte di queste ceneri si accumulano lungo le canne fumarie ma grazie all'ausilio di particolari tramogge è possibile conferirle esternamente alla canna fumaria; le ceneri che invece rimangono all'interno dei fumi sono fermate da sistemi di filtrazione che possono essere a maniche o elettrostatici e vengono posizionati all'uscita del camino dei fumi. Questa frazione mediamente corrisponde al 35-40% della massa totale in ceneri.

- Ceneri pesanti, ovvero le ceneri raccolte sotto la griglia della camera di combustione. Queste generalmente rappresentano la maggior parte delle ceneri totali (più del 60% sul totale per quasi tutte le biomasse) e contengono tutti i macronutrienti delle piante (CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O) ad esclusione dei composti azotati. La massa volumica di questa tipologia di ceneri (circa 1,3 t/m<sup>3</sup>) è tale da non consentire che vengano allontanate con i fumi come avviene appunto per le ceneri leggere. Queste ceneri vengono invece prelevate dalla camera di combustione e con diversi sistemi vengono convogliate a dei serbatoi di deposito.

### **4.3 LA PROBLEMATICHE DELLA RADIOATTIVITÀ NELLE BIOMASSE LEGNOSE**

Come largamente anticipato, uno dei principali problemi inerenti all'utilizzo delle biomasse come fonte di energia riguarda l'eventuale rilascio di sostanze tossiche per l'ambiente o per l'uomo durante la combustione. Sebbene le moderne tecnologie in favore della gassificazione al dispetto della semplice combustione siano nettamente meno impattanti è giusto investigare quali siano le sostanze radioattive e non che potrebbero essere contenute all'interno del legno e delle ceneri prodotte dalla combustione dello stesso.

Tra i biocombustibili solidi, il legno, escludendo la corteccia, è quello che presenta un minor contenuto di ceneri e una temperatura di fusione più elevata. Il problema della fusibilità delle ceneri può essere facilmente gestito a livello di grandi impianti con tecnologie di raffreddamento della griglia o scelta di un biocombustibile qualitativamente migliore (minor presenza di terriccio o ramaglia) e con una più elevata temperatura di fusione delle ceneri. Il legno in genere, avendo un punto di fusione elevato (circa 1300°C) e un basso contenuto di sostanze incombuste, avrà una produzione di scorie molto contenuta.

Un esempio pratico di quanto appena asserito è portato dalla centrale a biomassa collocata nella valle del Primiero. Questa centrale, precisamente una centrale di teleriscaldamento, con una produzione di circa 16 MW riesce a soddisfare il fabbisogno di circa 10'000 abitanti. La centrale brucia annualmente 65.000 msteri di cippato a fronte di una produzione di ceneri come scarto di circa 149.000 kg rappresentate in 92.000 kg di ceneri pesanti e 57.000 kg in ceneri leggere (Scalet, 2022).

**Tabella 4.4:** Dati centrale teleriscaldamento Primiero SMC (Scalet, 2022)

<b>Dati della centrale</b>	
Consumo annuo di cippato	65.000 msteri
Potenza erogata	16,1 MW
Lunghezza rete di tubazioni	45 km
Numero di utenze servite	1726
Produzione energia termica venduta sul mercato	21,4 GW/h
<b>Produzione di ceneri</b>	
Ceneri totali	149.000 kg
<i>Ceneri leggere</i>	<i>57.000 kg</i>
<i>Ceneri pesanti</i>	<i>92.000 kg</i>

Un importante problema, relativo soprattutto appunto ai grandi impianti, è lo smaltimento delle ceneri che ad oggi non tiene adeguatamente conto della possibile concentrazione di eventuali radionuclidi presenti nel legno utilizzato come combustibile in quanto le ceneri vengono conferite presso centri di smaltimento abilitati alla gestione dei rifiuti speciali.

Lo smaltimento delle ceneri è stato storicamente regolato dal Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) in cui le ceneri pesanti venivano classificate con il codice CER 100101 e le ceneri leggere con il codice CER 100103 e dunque entrambe definite come rifiuti speciali non pericolosi e comprese nella categoria Rifiuti inorganici provenienti da processi termici.

Tale decreto è stato abrogato dall'articolo 264 del Codice dell'ambiente, ovvero il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

Ad oggi, infatti, le ceneri sono smaltite secondo quanto previsto dalla parte quarta del D. lgs. 152/2006 relativo alla gestione dei rifiuti speciali.

La parte quarta del suddetto decreto disciplina, infatti, la gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti inquinati in attuazione delle direttive comunitarie sui rifiuti e sui rifiuti pericolosi. Le regioni e le province autonome, secondo l'articolo 177 comma 2, adeguano i rispettivi ordinamenti alle disposizioni di tutela dell'ambiente e dell'ecosistema contenuti nel presente decreto.

Il D. Lgs. 22/1997 prevedeva, tra le altre cose, anche delle procedure semplificate per lo smaltimento delle ceneri derivanti dalla combustione di biomasse legnose, nello specifico

le ceneri dovrebbero essere reimpiegate all'interno di cementifici, nell'industria dei laterizi e dell'argilla espansa oppure nella produzione di fertilizzanti. Oltre alle soluzioni brevemente elencate, il decreto prevedeva anche il conferimento in discarica a patto che quest'ultima fosse abilitata alla gestione dei rifiuti speciali. Il conferimento in discarica era considerato però un'ultima risorsa in quanto la via prioritaria doveva essere il recupero.

Anche il più innovativo ed attuale Codice ambiente all'articolo 179 detta i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti considerando anch'esso lo smaltimento come ultima ratio.

Alla luce dei fatti, la legge non sembrerebbe esprimere in maniera sufficientemente chiara il trattamento che dovrebbe essere riservato alle ceneri contenenti tracce di radionuclidi e/o metalli pesanti ma fornisce solamente indicazioni generali su quella che dovrebbe essere una corretta e prioritaria gestione di quelle che vengono ad oggi identificate come rifiuti non pericolosi derivanti da processi termici.

Il problema relativo però al contenuto di radionuclidi nelle ceneri da biomassa e nelle biomasse in genere, consultata la letteratura, sembra essere un problema affermato.

È emerso infatti che a 35 anni dal disastro di Chernobyl, come si evince anche dalla mappa della contaminazione radioattiva in Europa (figura 4.4), le tracce degli elementi radioattivi liberati dall'incidente del 26 aprile 1986 sono ancora presenti.

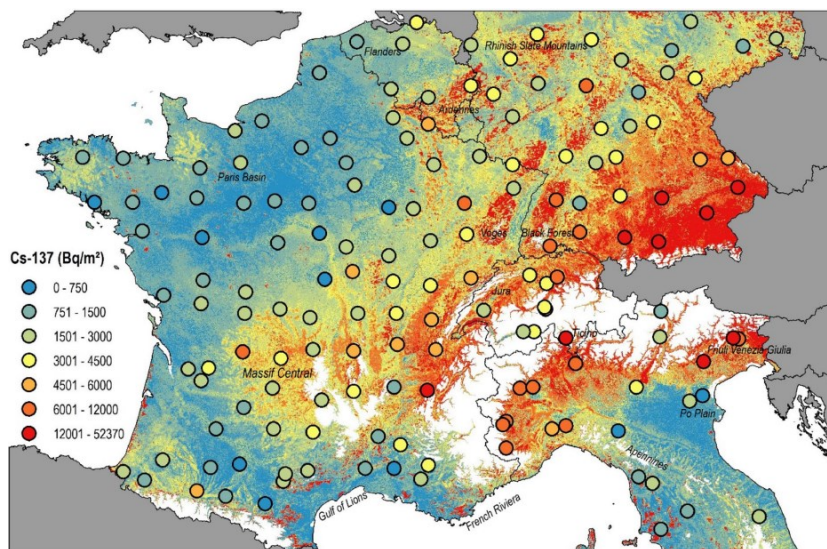
L'International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) ha unito un team costituito da più di 15.000 scienziati provenienti da 110 diverse nazioni in quella che è definita la "rete globale della cooperazione delle scienze forestali", durante questo congresso si è svolta una sessione intitolata "Contaminazione radioattiva degli ecosistemi forestali e uso sicuro dei prodotti forestali", il meeting ha rivelato diverse problematiche illustrando diverse presentazioni riguardo la radioattività delle aree forestali soggette agli incidenti nucleari di Chernobyl e di Fukushima.

Diverse sono le aree forestali contaminate dai radionuclidi e in entrambe le aree sono stati condotti immediatamente degli studi per capire come l'ecosistema foresta reagisca all'inquinamento radioattivo nel breve periodo, mentre oggi a più di 30 anni di distanza dal primo incidente nucleare ci si chiede invece come le foreste si sono evolute e trasformate nel lungo periodo.

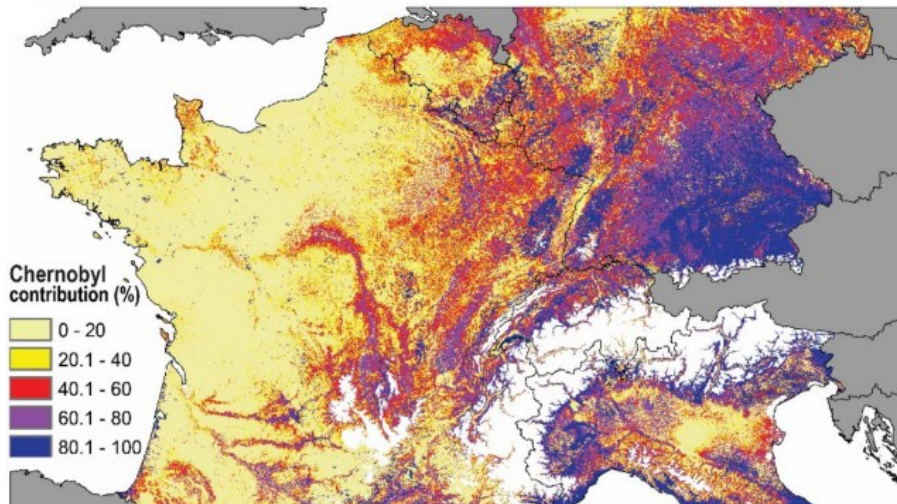
A livello europeo, un importante lavoro redatto da Meusburger et al. (2020) è riuscito attraverso il plutonio, a misurare il contenuto di Cesio nei suoli europei.

Radionuclidi artificiali infatti sono stati rilasciati nella stratosfera durante i test nucleari tra gli anni '50 e gli anni '80 del secolo scorso, salvo poi ricadere sul suolo in seguito agli eventi meteorici. Ci si aspetta che la distribuzione rispetti delle fasce latitudinali assecondando l'andamento delle precipitazioni; dunque, ci si aspetta un contenuto simile di Cesio in aree con simili livelli di precipitazione.

Come facilmente intuibile, il più grande rilascio di radionuclidi in atmosfera è avvenuto a causa dell'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl, infatti il deposito ha interessato diversi strati atmosferici ripercuotendosi, grazie alle condizioni pressoché favorevoli, in un'ampia distribuzione sui suoli europei. Viceversa, l'incidente avvenuto recentemente a Fukushima Dai-ichi ha avuto lievi ripercussioni sul territorio europeo.

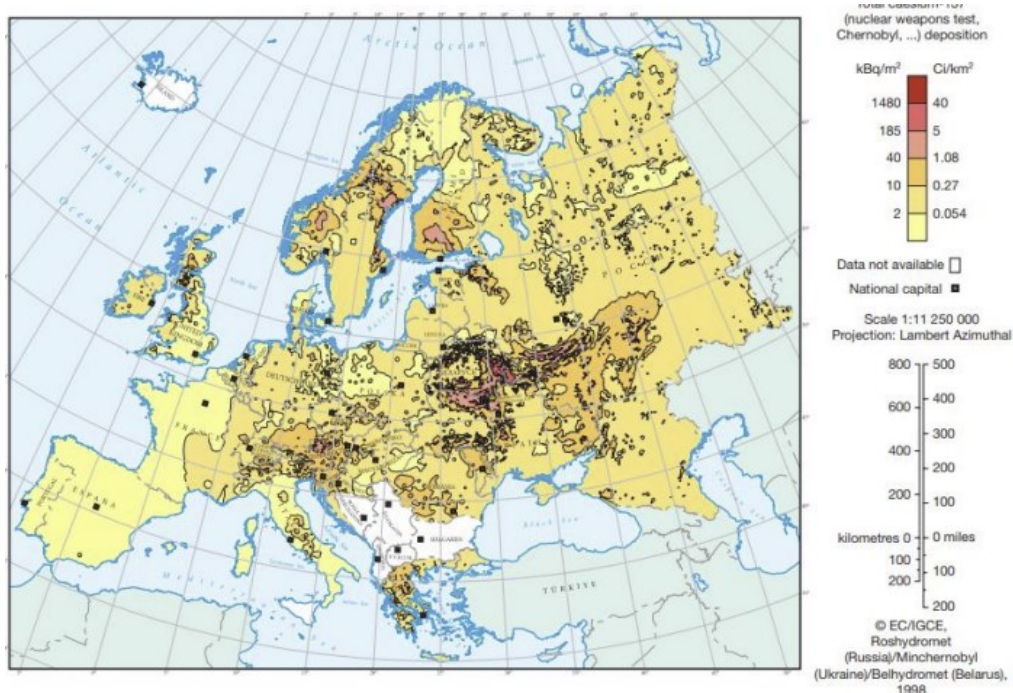


**Figura 4.4:**Contenuto di Cs-137 nei primi 20 cm di terreno (Meusburger et al., 2020)



**Figura 4.5:** Contributo alle perdite di Cs-137 nei primi 20 cm di terreno da parte di Chernobyl (Meusburger et al., 2020)

Zambelli et al. (2019) dimostra invece che le biomasse provenienti da aree sensibili, ovvero territori interessati dalla nube radioattiva, possono contenere alcuni radionuclidi artificiali, in concentrazioni che solitamente non sono allarmanti, ma al contempo non trascurabili a seguito della concentrazione nelle ceneri dopo la combustione della matrice che li contiene. La maggior parte dei suoli europei, compresa l'Italia, è caratterizzata dalla presenza di questi radionuclidi, in particolare del Cs-137.



**Figura 4.6:** Deposizione al suolo di Cs-137 dopo il disastro di Chernobyl (Meusburger et al., 2020)



A distanza di 30 anni sono ancora molte le matrici che presentano tracce di contaminazione dei radionuclidi immessi in atmosfera.

L'impiego sempre più frequente biomasse legnose ad uso energetico ha comportato uno sviluppo notevole del mercato che di conseguenza ha implementato la ricerca e la produzione di materia prima a costi minori, aprendo soprattutto le porte al mercato di importazione da paesi terzi. Già nel 2009 sono state rinvenute le prime partite di pellet contaminate da Cs-137 in varie regioni di Italia. Le prime misure effettuate da organi come ARPA hanno messo in luce concentrazioni che tuttavia non risultano essere allarmanti nella biomassa (2-33 Bq/kg) e che invece raggiungono concentrazioni estremamente più importanti nelle ceneri prodotte dalla combustione (40-2400 Bq/kg).

Amiro et al. (1996) si sono posti la domanda invece su ciò che accade agli elementi radioattivi all'interno delle biomasse una volta che le stesse sono state combuste.

Infatti, tale studio si occupa di determinare il contenuto di sostanze radioattive quali cromo, iodio e cesio post-combustione di 5 differenti campioni di biomassa ed il loro contributo al contenuto di radionuclidi nell'aria. Tipicamente, dopo la combustione, il residuo di ceneri ammonta a circa il 2% della massa originale per quanto riguarda il legno e il 5-10% per quanto riguarda invece la ramaglia. Dalle analisi delle ceneri è risultato dunque che la combustione risulta avere un forte impatto sulla redistribuzione dei radionuclidi nell'ambiente.

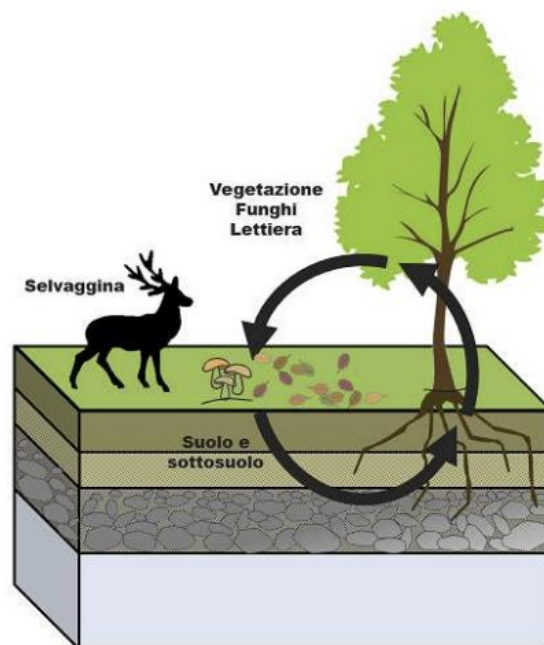
Chernobyl risulta tuttavia essere solamente l'emblema di un'incidente nucleare, in quanto negli ultimi anni ne sono stati registrati diversi, uno su tutti è rappresentato dal caso di Fukushima i cui impatti relativi all'ecosistema foresta sono definiti da Takahashi et al. (2016). In questo lavoro si afferma che l'incidente di Fukushima ha contaminato vaste aree di foresta in molte zone dell'Europa. Chiaramente il livello di radioattività raggiunto è sensibilmente inferiore rispetto quello prodotto dall'incidente di Chernobyl ma sicuramente non trascurabile. La contaminazione degli ecosistemi forestali è stata in generale bassa e trascurabile, ad eccezione delle zone più vicine a Fukushima. Particolare rilievo è dato alle differenze di impatto a breve e lungo termine all'interno degli ecosistemi forestali.

Lavori simili sono stati condotti anche nei paesi vicini, qui riportati per sottolineare nuovamente l'entità del problema. È il caso del lavoro condotto da Togni et al. (2016) nella vicina Svizzera. Il Cs-137, secondo Togni, ha una emivita di 30,17 anni, dunque si

stima che, a 30 anni dall'incidente, circa la metà sia decaduto. Le mappe della radioattività sono degli efficaci indicatori ma non rappresentano una verità assoluta in quanto la distribuzione all'interno del suolo e degli ecosistemi forestali può variare considerevolmente in funzione della tessitura, delle caratteristiche del suolo, delle specie presenti ma anche in relazione a fattori climatici e meteorologici.

Le biomasse legnose, oggetto principale della presente tesi, non possono essere altro che ricondotte all'ecosistema foresta; infatti, le piante vascolarizzate, tra cui quelle legnose dalle quali sono ricavate le biomasse, accrescendosi sono in grado di accumulare elementi minerali dal suolo.

Infatti, la migrazione verticale di elementi come il Cesio sarebbe particolarmente lenta per i suoli boschivi allo stato naturale. I quantitativi più rilevanti sono stati rinvenuti nei primi strati di humus superficiale che copre gli strati minerali sottostanti e dunque con la possibilità di essere assorbiti efficacemente da piante e funghi. Considerando il solo ecosistema forestale esso può essere ricondotto ad un ciclo chiuso; infatti, il radionuclide che parzialmente è assorbito dalla pianta può successivamente essere rilasciato al suolo sotto forma di materiale organico contaminato.



**Figura 4.7:** Possibile visione del flusso ciclico di Cs-137 in un ecosistema boschivo (Togni et al., 2016)

Da un punto di vista radiologico, i residui misurabili oggi si situano a livelli pressoché insignificanti per la salute delle persone e dell'ambiente. Il risultato dello studio spiega come, ancora oggi, sia possibile rinvenire residui di Cs-137 in diverse matrici, tra cui le

biomasse provenienti dagli ecosistemi forestali. Gli alberi per il loro naturale sviluppo necessitano di attingere direttamente o indirettamente, ai nutrienti presenti negli strati superficiali del terreno.

Negli ecosistemi naturali la maggior parte delle piante è in simbiosi con i funghi micorrizici, un fatto che complica molto i meccanismi di assorbimento e trasferimento dei radionuclidi dal suolo alle piante attraverso le radici. Esistono tre vie note per la deposizione di radionuclidi dall'atmosfera al suolo (Pieroni, 2021):

- Precipitazioni gravitazionale di particelle di grandi dimensioni (> di 0,01 mm)
- Dilavamento di aerosol radioattivi per precipitazione atmosferica
- Ricaduta secca di piccole particelle a causa della diffusione turbolenta in atmosfera.

L'intercettazione da parte della vegetazione può trattenere grandi quantità di depositi. In particolare, gli alberi sono efficienti intercettatori di aerosol.

La frazione di radionuclidi intercettati dall'albero, dal sottobosco e dagli strati organici è chiamata "frazione di intercettazione". I radionuclidi intercettati vengono quindi distribuiti tra questi compartimenti in proporzione alla biomassa di ciascun compartimento. Negli ecosistemi forestali, pertanto, gli alberi corrispondono alla componente con biomassa maggiore e quindi sono tra i più efficienti intercettatori di particelle radioattive (Pieroni, 2021).

Secondo Tobler et al. (1988), l'iniziale concentrazione di radiocesio è fortemente dipendente dalla superficie attiva esposta alla caduta delle particelle, da questo è possibile desumere che i tassi di intercettazione sono specie specifici in funzione della morfologia fogliare, della struttura e della densità della chioma.

Le principali specie arboree europee possono essere disposte nel seguente ordine di crescente densità della chioma e dunque crescente capacità di trattenuta dei radionuclidi: *Larix*, *Pinus*, *Betula*, *Quercus*, *Fagus*, *Abies*, *Picea*.

Feige et al. (1988) hanno dimostrato, invece, come anche il sottobosco rivesta una fondamentale funzione di intercettazione e ritenzione, infatti, uno spesso tappeto di licheni o muschi, è in grado di trattenere rilevanti quantità d'acqua.

Dunque, negli ecosistemi complessi solamente una piccola parte della radiazione raggiunge il suolo visto che una quota importante viene intercettata dalla vegetazione,

tuttavia parte di questa viene adsorbita dalle foglie e parte invece viene dilavata dalle precipitazioni raggiungendo il suolo.

Diversi ricercatori hanno dimostrato che specie differenti assorbono il radiocesio a velocità diverse secondo due diversi meccanismi principali, l'assorbimento fogliare e l'assorbimento radicale.

Rauret et al. (1994) afferma che le particelle che si depositano sulla superficie fogliare vengono inumidite successivamente dalle precipitazioni, a quel punto gli ioni di radiocesio vengono allora assorbiti dalle cellule epidermiche, tuttavia Withford (1968) sostiene che solamente una percentuale insignificante del radiocesio catturato dalle foglie possa essere assorbito e che invece la maggior parte venga invece trasferita al suolo.

Ma come anticipato l'assorbimento può avvenire anche attraverso le radici in maniera del tutto paragonabile al meccanismo di assorbimento dei nutrienti. Come è noto l'assorbimento radicale, così per i nutrienti ma anche in questo caso per il radiocesio dipende da una serie di fattori intrinseci del suolo e dalla profondità delle radici, infatti Guillite et al (1994) sostiene che le specie con radici poco profonde dimostrano un livello di contaminazione molto superiore rispetto le specie con apparato radicale fittonante.

Come anticipato, le piante forestali sono in simbiosi mutualistica con i funghi, questa simbiosi è definita micorrizzazione. I funghi micorrizici appartengono a due famiglie, gli Ascomiceti e i Basidiomiceti e sono molto utili per la pianta in quanto instaurano delle simbiosi con l'apparato radicale. La simbiosi è in realtà vantaggiosa per entrambe le parti, infatti la micorriza fornisce i nutrienti alla pianta mentre la pianta rilascia gli essudati radicali sottoforma di carboidrati di cui la micorriza si nutre.

Per quanto riguarda l'argomento di nostro interesse è interessante il comportamento che assumono le micorrize nei confronti dell'assorbimento e trasferimento dei metalli pesanti alla specie in simbiosi. In alcuni casi il fungo induce maggiori concentrazioni di sostanze all'interno della pianta mentre in altri casi, la guaina esterna del fungo, funge da barriera impedendo il trasferimento dei metalli alla pianta.

Alcuni ricercatori sostengono che il Cs-137 si comporti similmente al Potassio una volta entrato all'interno della pianta. In un bosco di conifere, precisamente di *Picea abies* gli aghi costituiscono il principale luogo di stoccaggio del potassio con circa il 44%, mentre circa il 34% è collocato nel legno e nella corteccia.

Se ammettiamo che Cs-137 e Potassio seguano gli stessi schemi di “deposizione” all’interno della pianta è possibile desumere che legno, aghi e corteccia siano i principali depositi di radiocesio e presumibilmente queste quantità potrebbero trasferirsi alla legna da ardere o alle biomasse prodotte partendo dal legno contaminato.

Quello che si può desumere da i vari studi è che il problema relativo al contenuto di radionuclidi negli ecosistemi forestali e in particolare all’interno delle biomasse è un problema acclarato e di interesse internazionale sul quale vale la pena eseguire un ulteriore approfondimento.

#### **4.4 I PRINCIPALI RADIONUCLIDI**

Con il termine radionuclide (indicato generalmente in sigla come RN) si intende una qualsiasi specie nucleare (nuclide) instabile che disgregandosi si trasforma in radiazioni particolarmente intense, in altri termini è un nuclide instabile che decade emettendo energia sottoforma di radiazioni.

Il termine radionuclide non è però da confondere con il termine radioisotopo; infatti, i radioisotopi sono isotopi radioattivi, cioè radionuclidi di uno stesso elemento chimico.

Più precisamente un radionuclide è un nucleo atomico instabile caratterizzato da un determinato numero di protoni e un determinato numero di neutroni. Un radioisotopo di un elemento è invece un insieme di radionuclidi avente lo stesso numero di protoni (stesso numero atomico) ma differente numero di neutroni. In sostanza, un radioisotopo attraverso il processo di decadimento si trasforma in un elemento stabile attraverso l’emissione di radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche.

I radionuclidi possono essere naturali o artificiali. I radionuclidi artificiali presenti in natura sono stati prodotti con l’origine della terra. Questi radionuclidi hanno un tempo di dimezzamento (tempo occorrente affinché una frazione degli atomi che compongono l’isotopo cessi di esistere) che è superiore a quello della creazione della terra ( $3 \times 10^9$  anni). Di seguito elencati alcuni dei principali radionuclidi di origine naturale con i rispettivi tempi di dimezzamento.

**Tabella 4.5:** Principali radionuclidi di origine naturale

<b>Radionuclide</b>	<b>Tempo di dimezzamento</b>
$^{40}\text{K}$	$1,28 \times 10^9$ anni
$^{50}\text{V}$	$1,4 \times 10^{17}$ anni
$^{87}\text{Rb}$	$4,75 \times 10^{10}$ anni
$^{113}\text{Cd}$	$9,3 \times 10^{15}$ anni
$^{138}\text{La}$	$1,05 \times 10^{11}$ anni

I radionuclidi artificiali sono stati invece creati dall'uomo in maniera artificiale attraverso i reattori nucleari. I primi radionuclidi vennero creati durante la prima metà del secolo scorso, ad oggi se ne possono contare diverse centinaia.

**Tabella 4.6:** Principali radionuclidi di origine artificiale

<b>Radionuclide</b>	<b>Tempo di dimezzamento</b>
$^3\text{H}$	12,33 anni
$^{14}\text{C}$	5730 anni
$^{38}\text{Sr}$	27,78 anni
$^{134}\text{Cs}$	2,1 anni
$^{137}\text{Cs}$	30 anni

I radionuclidi trovano oggi un largo impiego che spazia dalla produzione di calore, all'utilizzo degli stessi come traccianti, come sorgente di radiazioni ionizzanti e molto altro.

Gli isotopi inquinanti più significativi sono il Cs-137, lo Sr-90 e lo I-131. Attualmente, dopo il decadimento naturale dei radionuclidi a vita breve, compreso lo I-131 (emivita 8 giorni) il maggior pericolo è rappresentato dal Cs-137 e dallo Sr-90 oltre che dal plutonio e dal piombo.

Il Cs-137 è un isotopo radioattivo del metallo alcalino cesio che si forma principalmente come un sottoprodotto della fissione nucleare dell'uranio e possiede una emivita, ovvero il tempo in cui decade metà della massa iniziale dell'elemento stesso, di circa 30,17 anni. Anche lo Sr-90 è un isotopo radioattivo dello stronzio prodotto dalla fissione nucleare dell'uranio e ha una emivita radioattiva leggermente inferiore e pari a 28,8 anni.

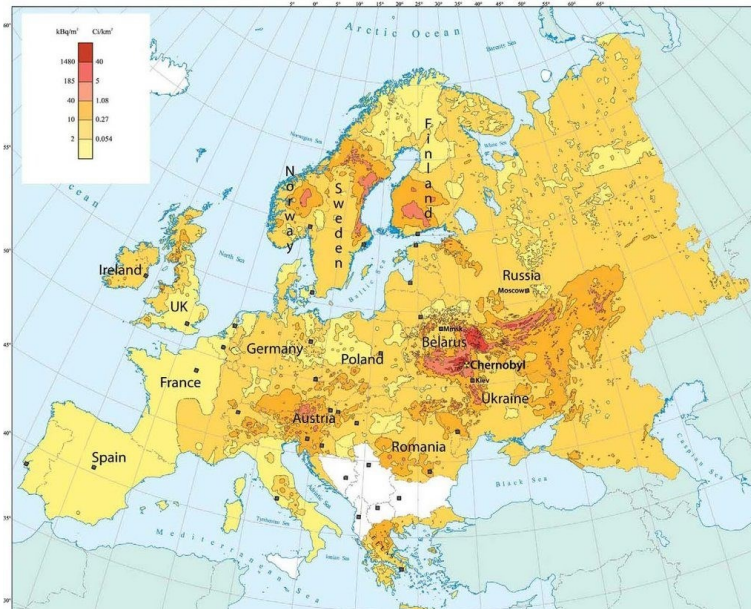
Piccoli quantitativi di questi elementi vennero rilasciati nell'ambiente all'epoca delle esplosioni nucleari in atmosfera durante i test che vennero eseguiti a partire dagli anni 50 ma anche da alcuni incidenti nucleari, su tutti il disastro di Chernobyl.

La contaminazione da Cs-137 è legata soprattutto a precipitazioni atmosferiche successive ai disastri nucleari che hanno causato l'accumulo nei territori presso i quali si sono abbattute. Il Cs-137, come dimostrato da Togni et al. è scarsamente mobile e permane negli strati superficiali del suolo (10-20 cm) per lungo tempo. Le piante, così come altri organismi vegetali quali funghi, frutti di bosco ma anche la selvaggina sono soggetti ad un assorbimento di questi elementi.

## 4.5 L'INCIDENTE DI CHERNOBYL

Nella primavera del 1986, precisamente nel mese di aprile, nella centrale di Chernobyl in Ucraina si verificò forse l'incidente nucleare più importante della storia. La centrale di Chernobyl si trova a 80 km dalla capitale Kiev, vicino al confine con la Bielorussia. Per negligenza del personale, durante un test il nocciolo del reattore si surriscaldò comportando l'esplosione delle tubature di alimentazione la conseguente fuoriuscita di materiale radioattivo. La nube tossica percorse migliaia di chilometri in poche ore con conseguenze che riguardarono gran parte del pianeta; infatti, in concomitanza dell'evento una serie di perturbazioni meteorologiche nei giorni successivi contribuirono allo spostamento della nube radioattiva sui territori circostanti e attraverso le precipitazioni una ricaduta non indifferente sul suolo. La distribuzione del pulviscolo radioattivo interessò tutta l'Europa, più in particolare laddove le precipitazioni furono più intense. La nube interessò gradualmente quasi tutti gli stati europei e successivamente anche i paesi oltreoceano (Baverstock et al, 2010).

In figura 2 sono riportati i risultati della modellazione della contaminazione dell'ARAC (U.S. Atmospheric Release Advisory Capability).



**Figura 4.8:** Mappa europea distribuzione del Cs-137 (De Cort, 1998).

In seguito dell'incidente si è cercato di fare una stima della quantità di radionuclidi rilasciata. La stima più accreditata ritiene che il rilascio effettivo sia stato di circa 5,3 EBq di materiale di diverso grado di aggregazione a cui aggiungere 6,5 EBq di gas nobili.



Nella seguente tabella sono riportati efficacemente i radionuclidi emessi e le relative quantità.

**Tabella 4.9:** Principali radionuclidi rilasciati e relativa attività (Internationa nuclear advisor Group, 1986)

Nuclide	Rilascio (PBq)	Nuclide	Rilascio (PBq)	Nuclide	Rilascio (PBq)
<sup>85</sup> Kr	33	<sup>90</sup> Sr	10	<sup>144</sup> Ce	116
<sup>133</sup> Xe	6500	<sup>103</sup> Ru	>168	<sup>239</sup> Np	945
<sup>132</sup> Te	1150	<sup>106</sup> Ru	>73	<sup>238</sup> Pu	0.035
<sup>131</sup> I	1760	+Ba	240	<sup>239</sup> Pu	0.03
<sup>134</sup> Cs	54	<sup>95</sup> Zr	196	<sup>240</sup> Pu	0.042
<sup>137</sup> Cs	85	<sup>99</sup> Mo	>168	<sup>241</sup> Pu	6
<sup>89</sup> Sr	115	<sup>141</sup> Ce	196	<sup>242</sup> Cm	0.9

I livelli di contaminazione sono stati determinati sia dalla quantità di radionuclidi presenti nella nube che ha attraversato il territorio sia dalla concomitante presenza di precipitazioni atmosferiche. La tipologia di contaminazione ha comportato differenti deposizioni di materiale in base alla presenza o meno di precipitazioni, infatti come già visto la contaminazione può avvenire in differenti maniere, tra cui il *rainout*, ovvero il rilascio di aerosol radioattivi dalla pioggia o il *washout*, che consiste nel dilavamento di una massa d'aria contenente aerosol radioattivo. Le condizioni metereologiche verificatesi hanno interpretato quindi un ruolo fondamentale nella contaminazione dei paesi dell'emisfero boreale facendo in modo che la nube attraversasse gran parte di questi paesi.

**Tabella 4.10:** Area contaminata da Cs-137 nei diversi paesi europei (De Cort, 1998)

<b>Range di contaminazione [KBq/m<sup>2</sup>]</b>	<b>37/185 KBq/m<sup>2</sup></b>	<b>185-555 KBq/m<sup>2</sup></b>	<b>555-1480 KBq/m<sup>2</sup></b>	<b>&gt;1480 KBq/m<sup>2</sup></b>	<b>% territorio contaminato</b>
Nazione	Superficie	Superficie	Superficie	Superficie	
Russia Europea	49800	5700	2100	300	1,5
Bielorussia	29900	10200	4200	2200	22,4
Ucraina	37200	3200	900	600	6,9
Svezia	12000				2,7
Finlandia	11500				3,4
Austria	8600				10,3
Norvegia	5200				1,3
Bulgaria	4800				4,3
Svizzera	1300				3,1
Grecia	1200				0,9
Slovenia	300				1,5
Italia	300				0,1
Moldavia	60				0,2

Dalla tabella soprastante e dalle figure precedenti si può notare come la superficie interessata dalla contaminazione abbia interessato maggiormente le aree nelle immediate vicinanze di Chernobyl e in maniera più contenuta, seppur sempre importante le nazioni dell'Europa del Nord. Italia e altre nazioni confinanti, ad esclusione dell'Austria, sono state interessate solo marginalmente dal passaggio della nube radioattiva e questo si è ripercosso in una minore concentrazione di Cs-137 che rimane tuttavia non trascurabile.

## 5 OBIETTIVI

L'obiettivo che la tesi propone di perseguire è la dimostrazione, attraverso delle prove di laboratorio a sostegno della letteratura esistente, della presenza di radionuclidi all'interno delle biomasse forestali, in particolare del cippato prodotto in provincia di Trento.

Se da una parte è acclarato il fatto che, vista la disponibilità di materia prima per la produzione, l'utilizzo di biomasse legnose possa giovare alla situazione economica italiana e contribuire inoltre ad una parziale decarbonizzazione dei consumi termici non è invece ancora chiaro quali possano essere invece gli inquinanti, in particolare radioattivi, che potrebbero essere immessi nell'ambiente in seguito alla combustione del prodotto legnoso.

Consultata la letteratura, sembrerebbe che il problema della radioattività contenuta all'interno delle biomasse sia un problema appurato, in particolare a carico del Cs-137 e del K-40.

Considerando il fatto che, da un'analisi della letteratura esistente, non esiste un quantitativo massimo di Cs-137 che possa definire un limite di tollerabilità per la salute umana, la tesi si propone di dare una maggior forza a quanto già investigato attraverso lavori di simile attitudine, ovvero il contenuto di radionuclidi all'interno delle biomasse ed in particolare all'interno delle ceneri.

Il Trentino, regione forestale per antonomasia, risulta essere un'importante produttore e consumatore di biomasse ai fini energetici. Motivo per il quale il risvolto pratico del presente lavoro possa essere quello di indirizzare ad una più corretta gestione del rifiuto proveniente dalla combustione, ovvero le ceneri; in quest'ultime, infatti, il contenuto in Cs-137 si concentra maggiormente. Le disponibilità economiche limitate, purtroppo, hanno permesso di investigare solamente il contenuto di Cs-137 all'interno delle ceneri e di solamente tre campioni all'interno del cippato, motivo per il quale è stato possibile solamente supporre la maggior concentrazione nelle ceneri piuttosto che nel prodotto tal quale.

In sintesi, gli obiettivi del presente elaborato sono:

- Tracciamento del contenuto di Cs-137 all'interno delle ceneri derivanti dalla combustione di cippato forestale della provincia di Trento.
- Sostegno dell'ipotesi assunta dalla letteratura riguardo la maggior concentrazione del Cs-137 nelle ceneri piuttosto che nel prodotto tal quale.

Indirettamente si persegue invece l'obiettivo di voler dar maggior forza all'utilizzo delle biomasse legnose nella filiera energetica nazionale. Per tale fine risulta fondamentale analizzare in maniera dettagliata ogni singolo parametro di un biocombustibile, ed è per questo necessario implementare le conoscenze in materia di radioattività.

Dunque, l'elaborato propone di approfondire la conoscenza in merito al problema e fare in modo che qualora sussista possa essere controllato con dei limiti di legge al fine di tutelare ed indirizzare i lavoratori ad una corretta gestione e smaltimento delle ceneri.

## **6 MATERIALI E METODI**

Lo studio è stato condotto prevedendo una prima fase di campionamento in diverse zone della provincia di Trento. Lo schema di campionamento ha previsto la suddivisione del territorio provinciale in 9 sotto aree all'interno delle quali sono stati prelevati un numero di campioni di cippato compreso tra due e quattro. Dai 27 campioni di cippato, attraverso un processo produttivo si sono ottenuti altrettanti campioni di pellet che sono stati bruciati con il fine di produrre delle ceneri. In seguito, i 27 campioni di cippato sono stati analizzati presso il Laboratorio Analisi Biocombustibili del Dip. TESAF, mentre le ceneri sono state analizzate presso il Laboratorio CNR-ICMATE di Padova unitamente ad alcuni campioni di cippato tal quale.

### **6.1 INQUADRAMENTO DEL TERRITORIO OGGETTO DI STUDIO**

La provincia di Trento ha carattere prevalentemente montano; infatti, oltre il 70% della superficie provinciale si trova a quote superiori ai 1000 m s.l.m.; la superficie complessiva della provincia è pari a 620.000 ha ettari, il 63% dei quali è occupato da foreste. Le foreste sono caratterizzate da una gestione marcatamente naturalistica con netta prevalenza di boschi ad alto fusto rispetto ai cedui. I boschi ad alto fusto, in origine coetanei, stanno assumendo, grazie anche ad una gestione indirizzata verso la selvicoltura naturalistica, una maggiore stratificazione. Più del 50% delle fustaie presentano, infatti, i requisiti per essere classificate come multiplane.

In provincia di Trento il 76% delle foreste è di proprietà pubblica, mentre il 24% appartiene a privati. Le proprietà pubbliche sono soggette a regolare pianificazione, mentre per quanto riguarda le proprietà private solamente quelle più consistenti sono oggetto di pianificazione. I dati assestamentali, ovvero riferiti alle piante il cui diametro è superiore ai 17,5 cm, stimano una biomassa di 63 milioni di metri cubi. L'inventario forestale nazionale, che invece considera la biomassa di tutte le piante con diametro maggiore di 4,5, cm stima che la massa legnosa immagazzinata nei boschi del trentino sia quasi il doppio: 106 milioni di metri cubi (Servizio Foreste e Servizio Faunistico, 2022). Le aree di studio interessate dalla presente indagine hanno coinvolto 9 distretti forestali che complessivamente coprono tutta la provincia di Trento.



**Figura 6.1:** Suddivisione del territorio provinciale in distretti forestali.

I boschi trentini sono gestiti secondo le prescrizioni del piano di assestamento che fornisce indicazioni circa le modalità di taglio, la quantità di legname estraibile da ogni particella forestale ed altre informazioni. La particella forestale è l'unità territoriale di base per la gestione ed ha una estensione di 10-20 ettari in media. Complessivamente l'80% delle foreste trentine sono gestite tramite un piano che deve subire una revisione ogni 10 anni. In fase di revisione vengono fornite preziose informazioni circa la quantità e la qualità della biomassa presente.

In generale, la coltivazione dei boschi in trentino si rifà alla selvicoltura naturalistica, in maniera tale che venga conservato l'equilibrio tra le diverse funzioni che la foresta può svolgere. Infatti, per fare un esempio, tutte le foreste trentine sono soggette a vincolo idrogeologico in quanto esercitano l'importante funzione di mantenimento della stabilità dei versanti.

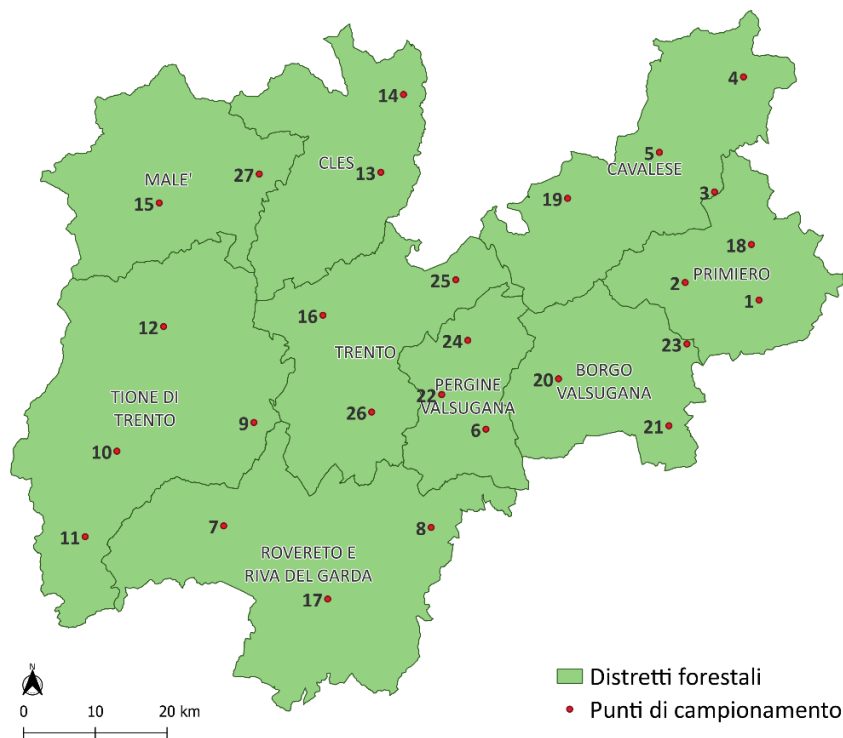
## 6.2 RACCOLTA, CARATTERISTICHE E TRATTAMENTO DEI CAMPIONI

Lo schema di campionamento, definito a tavolino, ha previsto una prima fase di suddivisione territoriale per garantire una copertura omogenea dell'area su cui insiste la provincia di Trento. Si sono quindi inizialmente individuate nove macroaree corrispondenti ai distretti forestali, successivamente per ogni area è stato previsto un numero di campioni variabile da 2 a 4 in relazione alla disponibilità di cantieri forestali in corso e alle dimensioni del distretto forestale. Il campionamento è stato eseguito durante il mese di maggio 2022 prelevando per ogni punto circa 60 litri di cippato.

I campioni in totale sono 27, ripartiti nel seguente modo e rappresentati in figura 6.2:

**Tabella 6.1:** Distribuzione dei campioni nei diversi distretti forestali

DISTRETTO	CAMPIONI
Primiero	1, 2, 18
Fiemme e Fassa	3, 4, 5, 19
Borgo Valsugana	20, 21, 23
Pergine	6, 22, 24
Trento	16, 25, 26
Riva del Garda e Rovereto	7, 8, 17,
Tione	9, 10, 11, 12
Cles	13, 14
Malè	15, 27



**Figura 6.2:** Punti di campionamento e Distretti Forestali.

### 6.2.1 Caratteristiche dei campioni

Per ogni campione è stato previsto il prelievo di un quantitativo di cippato che permettesse di riuscire a produrre una quantità di pellet tale per cui, una volta sottoposto a combustione, rimanesse un quantitativo sufficiente di ceneri per le analisi di radioattività. Con delle considerazioni circa il contenuto medio in ceneri del cippato è stato stimato che il quantitativo sufficiente per portare a completamento le analisi qualitative e ottenere altresì la giusta quantità di ceneri fosse di circa 50 litri. Per precauzione ad ogni punto di campionamento sono stati prelevati 60 litri.

Il campionamento è avvenuto in più riprese durante il mese di maggio. Si è cercato di rispettare per quanto possibile uno standard qualitativo dei campioni così da garantire, ove possibile, una certa omogeneità del pellet prodotto.

Lo standard qualitativo prevedeva che il cippato fosse prodotto principalmente da piante intere di abete rosso (*Picea abies*) lavorate direttamente in bosco. Questa tipologia di cippato è classificata come cippato forestale o cippato verde in quanto prodotto dagli scarti di lavorazione direttamente in bosco ed altresì dalle piante che non verranno utilizzate nella produzione di assortimenti di pregio.



Uno degli obiettivi dell'analisi era però coprire tutta la provincia di Trento in maniera omogenea, dunque, è stato necessario cercare un compromesso in relazione al fatto che in alcune aree il cippato prodotto non appartenesse in maniera prioritaria a piante di *Picea abies* ma piuttosto ad un mix di *Picea abies*, *Pinus sylvester* e *Pinus nigra* con quantitativi sporadici di legname proveniente da latifoglie.

**Tabella 6.2:** Composizione e provenienza dei campioni

CAMP.	DISTRETTO	ZONA	SPECIE	QUALITÀ	DATA RACCOLTA
1	Primiero	Bedolè	<i>Picea abies</i>	ottima	06/05/2022
2	Primiero	Caoria	<i>Picea abies</i>	scarsa	06/05/2022
3	Fiemme	Paneveggio	<i>Picea abies</i>	buona	06/05/2022
4	Fiemme	Canazei	<i>Picea abies</i>	ottima	06/05/2022
5	Fiemme	Moena	<i>Picea abies</i>	ottima	06/05/2022
6	Pergine	Levico	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
7	Rovereto e Riva	Nogaredo	Misto conifera	ottima	07/05/2022
8	Rovereto e Riva	Villagarina	Misto conifera	buona	07/05/2022
9	Tione	Comano	<i>Picea abies</i>	buona	07/05/2022
10	Tione	Roncone	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
11	Tione	Storo	Misto conifera	buona	07/05/2022
12	Tione	Pinzolo	Misto conifera	scarsa	07/05/2022
13	Cles	Predaia	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
14	Cles	Malosco	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
15	Malè	Ossana	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
16	Trento	Andalo	<i>Picea abies</i>	ottima	07/05/2022
17	Rovereto e Riva	Vallagarina	Misto conifera	ottima	13/05/2022
18	Primiero	San Martino	<i>Picea abies</i>	ottima	21/05/2022
19	Fiemme	Cavalese	<i>Picea abies</i>	ottima	21/05/2022
20	Borgo Vals.	Torcegno	<i>Picea abies</i>	buona	28/05/2022
21	Borgo Vals.	Grigno	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
22	Pergine	Pergine	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
23	Borgo Vals.	C. Tesino	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
24	Pergine	Baselga	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
25	Trento	Valda	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
26	Trento	Ravina	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022
27	Malè	Croviana	<i>Picea abies</i>	ottima	28/05/2022

La distribuzione dei campioni, seppur relativamente omogenea ha dovuto tener conto della quantità e disponibilità di cantieri di cippatura. Nella tabella soprastante, come si nota, viene riportata nella penultima colonna la voce qualità, nello specifico fa riferimento al quantitativo di aghi o terriccio rinvenuti all'interno del campione:

- Qualità ottima: basso contenuto di aghi, foglie o altri inquinanti
- Qualità buona: medio contenuto di aghi, foglie o altri inquinanti
- Qualità scarsa: eccessivo contenuto di aghi, foglie o altri inquinanti

### **6.2.2 Produzione del pellet**

Come già anticipato, per ottenere i campioni di cenere su cui sono state eseguite le analisi di radioattività si è dovuto passare attraverso l'incenerimento in stufa previa pellettizzazione di ciascun campione.

Per la produzione del pellet si è impiegata la pellettatrice ad uso domestico della ditta Ceccato Olindo modello MAGIC ELETTRICA 7,5 HP con una produzione oraria che oscilla tra i 30 e i 70 kg/ora. La pellettatrice è alimentata con segatura il cui contenuto idrico deve essere compreso tra l'8 e il 14%. La produzione del pellet ha previsto allora diverse sottofasi che vengono descritte qui di seguito.

#### *Macinatura dei campioni*

Dopo aver essiccato in stufa i campioni di cippato si è provveduto alla macinatura attraverso un mulino a coltelli dotato di una griglia con fori della dimensione di 4 mm. Essendo i campioni di cippato freschi, si è reso necessario portare il contenuto idrico degli stessi al di sotto del 20% per poter procedere alla macinatura in maniera efficace. Per l'essiccazione i campioni sono stati riversati all'interno di contenitori metallici e identificati da un codice univoco, successivamente i contenitori sono stati inseriti all'interno di una stufa ventilata per 24 ore a 60°C.



**Figura 6.3:** Essiccazione dei campioni di cippato (Foto: Pradel N., 2022)

#### *Condizionamento della segatura*

Dopo aver ottenuto la segatura si è proceduto all'essiccazione della stessa attraverso una stufa ventilata alla temperatura costante di 105°C per 24 ore. L'essiccazione si è resa necessaria per poter portare i campioni allo stato anidro così da poterne successivamente omogeneizzare il contenuto idrico nella fase successiva.

Per alcuni campioni si è utilizzato uno strumento in grado di indicare il contenuto idrico della segatura così da agevolare le operazioni e procedere in maniera più spedita.

Lo strumento in questione è il WÖHLER HF-FW 550 SET, tale strumento è in grado di misurare l'umidità delle biomasse o altri materiali utilizzando una sonda semplice o in alternativa una sonda a percussione per la legna da ardere. Per le biomasse sciolte invece è utilizzata una bilancia tipo Wöhler FW 550.



**Figura 6.4:** Whöler HF-FW-550-SET (WEB, 2022)

### *Umidificazione*

Dopo aver pesato i campioni allo stato anidro, ad ognuno è stato aggiunto il 12% del proprio peso in acqua attraverso un erogatore a pompa manuale. La segatura è stata riversata sopra un telo di nylon sul quale è stata miscelata manualmente per garantire una certa omogeneità al prodotto. Il materiale è infine stato sigillato all'interno di un sacco di plastica per almeno 24 ore per ottenere un prodotto completamente omogeneo per quanto concerne il contenuto di umidità.

Il quantitativo d'acqua da aggiungere ai campioni di segatura allo stato anidro è stato calcolato attraverso la seguente formula:

$$- P_{acqua} = P_{anidro} \times 0,12 \quad (6. 1)$$

- $P_{acqua}$  = Peso dell'acqua da aggiungere alla segatura
- $P_{anidro}$  = Peso della segatura dopo l'essiccazione

Per quanto riguarda i campioni il cui contenuto idrico è stato misurato attraverso lo strumento in figura 6.4 la quantità d'acqua aggiunta è stata calcolata attraverso una formula leggermente diversa così da aggiungere solamente l'acqua mancante per arrivare al 12%.

$$- P_{acqua} = (P_1 - M) \times (12 - M\%) \quad (6. 2)$$

- $P_1$  = Peso della segatura
- $M$  = Contenuto idrico della segatura espresso in kg
- $M\%$  = Contenuto idrico della segatura espresso in %

I risultati ottenuti hanno subito una leggera maggiorazione perché sono state considerate eventuali perdite dovute all'evaporazione. Sono stati infatti aggiunti 50 grammi d'acqua per ogni campione.



**Figura 6.5:** Umidificazione della segatura (Foto: Pradel N., 2022)

### Pellettatura

Questa fase è stata effettuata impiegando la pellettatrice della ditta Ceccato Olindo modello MAGIC ELETTRICA 7,5 HP (figura 6.6). Questa macchina si caratterizza per l'elevata potenza (7,5 HP) nonostante una dimensione ridotta (850 mm x 680 mm x 1110 mm) ed un peso di 150 kg.

La trafila presenta fori dal diametro di 6 mm; la trafila con un movimento rotatorio estrude il pellet grazie all'intervento di due rulli che, ruotando al di sopra della stessa, spingono la segatura attraverso la trafila. La macchina è azionata da un motore elettrico trifase con tensione di 400V.

Inizialmente si è reso necessario testare la macchina per regolare la distanza tra i rulli e la trafila; questa distanza risulta essere fondamentale per ottenere un prodotto qualitativamente valido oltre che a garantire una minore usura degli organi operativi della pellettatrice. Infatti, se la distanza fosse troppo elevata, il pellet prodotto avrebbe una durabilità meccanica molto bassa, viceversa se la distanza tra la trafila e i rulli fosse troppo limitata tutti i dispositivi sarebbero soggetti a un'usura non indifferente. Tale distanza è stata regolata attraverso due dadi esagonali situati alla base del sistema di alimentazione della macchina.

Dopo aver regolato la macchina, si è passati alla produzione vera e propria. La prima operazione ha previsto il riscaldamento della macchina, o meglio, della trafila; questa fase è stata realizzata alimentando la macchina con della farina di crusca che, non contenendo lignina, non pellettizza e può dunque essere riutilizzata. Dopo aver scaldato la trafila si è

proceduto a testare la macchina con della segatura in eccesso e si è considerata la macchina pronta alla pellettatura quando il pellet che fuoriusciva presentava delle dimensioni accettabili. Con una temperatura della trafilatura troppo bassa il pellet prodotto ha una qualità assolutamente infima, presentando un grado di sfaldatura elevato, dimensioni molto ridotte oltre ad un elevato quantitativo di particelle fini (< 3,15 mm).

La pellettatrice è stata successivamente alimentata manualmente attraverso l'utilizzo di una sessola cercando di dare una certa continuità al processo di alimentazione.

Durante questa fase è bene avere cura di non sottoalimentare, ma neanche di sovralimentare la macchina; infatti, nel primo caso aumenta il livello di usura degli organi comprimenti, mentre nel secondo caso sussiste il rischio di intasamento della bocca di alimentazione.

La pellettatrice è stata posizionata in maniera tale che il pellet ricadesse all'interno di un setaccio con dimensione dei fori di 3,15 mm in modo tale che contemporaneamente alla produzione venissero rimosse anche le eventuali particelle fini prodotte.

Il raffreddamento del pellet, operazione fondamentale per la durabilità dello stesso, è avvenuta attraverso l'impiego di un ventilatore in grado di insufflare aria fredda direttamente sul pellet in caduta.

Per alcuni campioni, vista la presenza più abbondante di corteccia o terra, si è operata una seconda operazione di pellettatura in quanto con solamente un passaggio il pellet prodotto risultava fragile e disomogeneo.

I campioni trattati sono stati complessivamente 27 per una durata totale delle operazioni di 6 settimane.



**Figura 6.6:** Produzione del pellet (Foto: Pradel N., 2022)

### *Raffreddamento*

Come detto precedentemente il pellet dopo essere stato prodotto deve subire un rapido raffreddamento per permetterne un veloce indurimento. In pratica, il prodotto passa da una temperatura stimata di 90-100 °C a quella dell'ambiente. L'escursione termica del pellet risulta fondamentale per migliorarne le caratteristiche fisico meccaniche. In questo specifico processo produttivo è stato utilizzato un sistema di raffreddamento che ha previsto l'utilizzo di un ventilatore di uso domestico in grado di insufflare aria fredda direttamente sul pellet fuoriuscente dallo scivolo di scarico. Quindi il pellet una volta caduto all'interno del setaccio è risultato essere praticamente già freddo.

Il pellet prodotto, una volta riempito il setaccio, veniva riversato all'interno di una scatola rettangolare in plastica in maniera tale che potesse raffreddarsi più velocemente.

Da ogni campione di pellet, a questo punto completamente freddo, sono stati estratti e sigillati in sacchetti in plastica trasparente 2,5 kg di prodotto, necessari per la realizzazione delle prove fisico-meccaniche di laboratorio. Il restante pellet invece è stato bruciato all'interno di una stufa apposita.



**Figura 6.7:** Conservazione del pellet prodotto (Foto: Pradel N., 2022)

### *Incenerimento*

L'obiettivo del presente lavoro, come già anticipato, è quello di quantificare i radionuclidi o altri inquinanti contenuti all'interno delle ceneri del cippato, confrontandone poi il contenuto con la segatura dello stesso campione. Per l'analisi della radioattività è stato necessario riempire un barattolo di 50 ml di capacità con le ceneri ottenute dalla combustione di 8 kg di pellet per ciascun campione.

La combustione è avvenuta attraverso una stufa a pellet che appoggia su una bilancia della precisione di 10 grammi. Dopo la combustione è stato necessario lasciar raffreddare la stufa e le ceneri prima di poterle raccogliere. Una volta trascorso il tempo necessario le ceneri contenute nel vano di raccolta sono state sigillate all'interno di un barattolo e catalogate.

È stato scelto di utilizzare questa tipologia di combustione, piuttosto che la combustione in muffola, per ricreare le condizioni di combustione reali che avvengono negli impianti di combustione a biomassa.

Terminata la fase di combustione si sono ottenuti 27 campioni di cenere che sono stati conferiti Laboratorio CNR-ICMATE unitamente ad 1 litro di segatura proveniente da 3 campioni.





**Figura 6.8:** Combustione dei campioni di pellet (Foto: Pradel N., 2022)



**Figura 6.9|** Campione di cenere (Foto: Pradel N., 2022)

### 6.3 ANALISI QUALITATIVE DEL CIPPATO

Per ognuno dei campioni di pellet prodotto si è proceduto con le diverse analisi di laboratorio. Per forza di cose, per poter produrre le ceneri si è dovuti passare attraverso la pellettizzazione del materiale, dunque nonostante le analisi siano state effettuate sul pellet autoprodotta sono in realtà riferite al cippato.

Le analisi di laboratorio eseguite sono state nell'ordine: contenuto idrico, potere calorifico, contenuto in ceneri e fusibilità delle ceneri. In realtà, le analisi sono state svolte in maniera simultanea ad eccezione della fusibilità delle ceneri che è stata effettivamente svolta per ultima.

Per ogni prova e per ogni campione, al fine di ottenere dei dati statisticamente significativi, sono state effettuate tre ripetizioni.

### 6.3.1 Contenuto idrico

Il contenuto idrico esprime la quantità di acqua contenuta nel campione tal quale, ovvero facendo riferimento alla massa del legno fresco.

Considerando che il contenuto idrico del cippato è stato condizionato al fine di produrre il pellet questa analisi non può in realtà essere riferita al cippato ma bensì al pellet ed infatti l'analisi perde di significato ed è qui riportata solamente per il successivo calcolo del potere calorifico inferiore e superiore del campione appena ricevuto (*as received*).

Il valore è calcolato seguendo le indicazioni estratte dalla norma UNI EN ISO18134 -1 "Biocombustibili solidi. Determinazione dell'umidità – Metodo di essiccazione in stufa. Parte 1: Umidità totale – Metodo di riferimento" (2015).

Per le analisi è stata impiegata una bilancia di precisione in grado di misurare fino al centesimo di grammo, delle vaschette in alluminio identificate univocamente da un codice alfanumerico e una stufa ventilata in grado di espellere l'umidità.

Dal campione iniziale di 2,5 kg sono stati prelevati tre sotto campioni che successivamente sono stati inseriti all'interno di alcune vaschette d'alluminio di cui è stata preventivamente misurata la tara. Le vaschette sono state pesate ( $P_i$  - peso lordo) e lasciate in stufa per almeno 24 ore a 105°C in modo che il materiale potesse raggiungere lo stato anidro. Trascorse le 24 ore i campioni sono stati nuovamente pesati ( $P_f$  – peso lordo).

Per il calcolo del contenuto idrico, una volta ottenuti i dati di laboratorio, è stato sufficiente applicare la seguente formula:

$$M = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (6.3)$$

- $M$  = contenuto idrico (%)
- $m_1$  = tara in g
- $m_2$  = massa in g del campione fresco ( $P_i$ )
- $m_3$  = massa in g del campione essiccato ( $P_f$ )
- $m_4$  = massa fredda in g della vaschetta di riferimento

I valori delle tre prove relative ad ogni campione sono stati poi mediati, ottenendo un valore unico.



**Figura 6.10:** Essiccazione dei campioni di pellet per calcolare il contenuto idrico (Foto: Pradel N., 2022)

### *Macinatura del campione*

Un passaggio precedente all'analisi del potere calorifico, ma anche del contenuto in ceneri e della fusibilità delle stesse, consiste nella trasformazione del pellet prodotto in segatura attraverso un mulino a coltelli dotato di griglia da 1 mm. Il prodotto ottenuto successivamente è stato conservato all'interno di vaschette in alluminio identificate univocamente da un codice.



**Figura 6.11:** Segatura prodotta e utilizzata nelle analisi (Foto: Pradel N., 2022)



**Figura 6.12|** Dettaglio del mulino a coltelli (Foto: Pradel N., 2022)

### 6.3.2 Potere calorifico

Il potere calorifico è definito come la quantità di calore (espressa in Joule) sviluppata dalla combustione completa dell'unità di massa (kg) o di volume (m<sup>3</sup>) di un combustibile. Le analisi di laboratorio, attraverso la strumentazione descritta in seguito, hanno individuato il potere calorifico superiore, ovvero il calore che tiene conto del calore latente di vaporizzazione dell'acqua generata dalla combustione. Successivamente, attraverso le opportune formule sono stati calcolati anche gli altri poteri calorifici. La misura del potere calorifico di un biocombustibile solido è definita dalla norma UNI EN ISO 18125 "Biocombustibili solidi. Determinazione del potere calorifico" (2018).

Per le analisi sono stati impiegati due calorimetri tipo IKA C200, una pressa idraulica per la produzione di una pastiglia di segatura e due bombe calorimetriche o vessel oltre ad una bilancia con precisione al millesimo di grammo. Le analisi sono state eseguite con il supporto del software Calvin.

Dopo aver pesato circa 0,5 g di segatura si procede alla pressatura della stessa attraverso una pressa idraulica ottenendo una pastiglia di segatura. Il peso della pastiglia di segatura viene annotato all'interno del software, unitamente al numero di vessel<sup>1</sup> impiegato e al calorimetro impiegato. La pastiglia è inserita all'interno di un crogiolo in quarzo sul quale è adagiata una miccia di potere calorifico noto.

La bomba calorimetrica a questo punto, dopo aver inserito 1,5 cc di H<sub>2</sub>O sul fondo<sup>2</sup>, viene sigillata con il proprio coperchio. All'interno della bomba è inserito anche dell'ossigeno; infatti, la combustione deve avvenire in sovrasaturazione di ossigeno. La pressione interna alla bomba è pari a 30 bar.

All'interno del software Calvin sono riportati i seguenti dati:

- Calorimetro impiegato
- Vessel impiegato
- Peso della pastiglia
- Potere calorifico corpo estraneo 1, in questo caso è pari a quello della miccia e dunque 65 Joule.

---

<sup>1</sup> È fondamentale annotare il numero del vessel impiegato in quanto ogni vessel ha caratteristiche univoche dato che viene tarato (Cvalue) con acido benzoico il cui potere calorifico è noto.

<sup>2</sup> Viene inserita dell'acqua sul fondo per assicurarsi che l'acqua prodotta dalla combustione non vaporizzi e rimanga allo stato liquido, quindi non venga investita dell'energia per la vaporizzazione della stessa.

- Potere calorifico corpo estraneo 2<sup>3</sup>.
- Codice del campione

Infine, la bomba calorimetrica viene dotata di un connettore e inserita all'interno del calorimetro. All'interno del calorimetro è inserita dell'acqua perché il calorimetro restituisce il valore del potere calorifico in base all'escursione di temperatura registrata prima e dopo la combustione. Il calorimetro a questo punto viene chiuso e la prova comincia, la prova ha una durata complessiva di 16 minuti.

Il software ha restituito, una volta terminate le prove, dei valori espressi in J/g che successivamente sono stati esportati per il calcolo del potere calorifico inferiore.

Per ogni campione sono state eseguite almeno tre prove; tuttavia, per alcuni campioni si è reso necessario ripetere alcune prove per la mancata ripetibilità delle prove, la mancata combustione della pastiglia o in alcuni casi addirittura la fuoriuscita della pastiglia dal crogiolo.

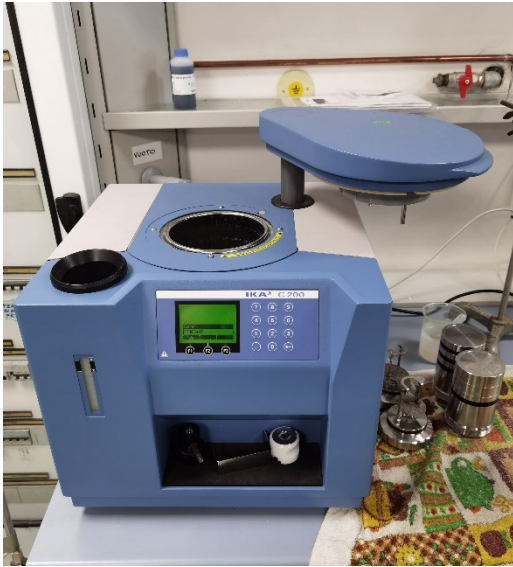


**Figura 6.13:** Pressa idraulica utilizzata per la produzione della pastiglia di segatura (Foto: Pradel N., 2022)



**Figura 6.14:** Dettaglio della pastiglia di segatura prodotta (Foto: Pradel N., 2022)

<sup>3</sup> Quando il materiale è troppo anidro (es: carbonella), non è possibile creare delle pastiglie da inserire nel calorimetro; quindi, è utilizzato un sacchettino in plastica di potere calorifico noto.



**Figura 6.15:** Calorimetro tipo IKAC200 (Foto: Pradel N., 2022)

Ottenuti i risultati delle differenti prove ed accertata la ripetibilità delle stesse è necessario procedere al calcolo analitico degli altri poteri calorifici partendo dal valore medio delle prove per ogni singolo campione.

Le formule che sono state utilizzate in fase di calcolo sono le seguenti:

$$- \quad PCS_{dry} = \frac{PCS_w \times 100}{100 - M_{ad}} \quad (6.4)$$

- $M_{ad}$  = contenuto idrico del cippato polverizzato (6.8)
- $PCS_w$  = Potere calorifico ottenuto dalle prove di laboratorio

$$- \quad PCS_{as\ received} = PCS_{dry} \times \frac{100 - M}{100} \quad (6.5)$$

- $M$  = Contenuto idrico del pellet prodotto partendo dal cippato (6.3)

$$- \quad PCI_{dry} = PCS_{dry} - 1,32 \quad (6.6)$$

$$- \quad PCI_{as\ received} = PCS_{dry} \times \frac{100 - M}{100} \quad (6.7)$$

### 6.3.3 Contenuto ceneri

Per la misura del contenuto in ceneri di un campione si fa riferimento alla norma I EN ISO 18122 “Biocombustibili solidi: determinazione del contenuto in ceneri” (2016). Il contenuto in ceneri è stato determinato attraverso un metodo termo-gravimetrico considerando tre masse differenti; infatti, è stato considerato il peso fresco di circa un grammo di segatura, il peso secco e il peso delle ceneri residue dopo aver subito una combustione completa.

Per ogni campione sono stati previsti 3 crogioli, che dopo essere stati puliti in muffola a 550°C e fatti raffreddare all'interno di una boule in vetro in grado di creare il vuoto, di cui è stata misurata la tara. Ogni crogiolo è stato riempito con poco più di un grammo di segatura, i crogioli sono stati pesati e inseriti all'interno di una stufa ventilata per almeno 24 ore alla temperatura di 105°C. Una volta raggiunto lo stato anidro, i campioni sono stati fatti raffreddare all'interno di una boule in vetro e successivamente pesati. Infine, i campioni sono stati bruciati in muffola alla temperatura di 550°C, la procedura ha permesso la combustione di tutta la sostanza organica contenuta all'interno della segatura, lasciando incombusta la parte inorganica, ovvero le ceneri. I crogioli sono stati raffreddati per un'ora all'interno della stessa boule in vetro utilizzata precedentemente, in maniera tale che non potessero assorbire umidità dall'ambiente.

Per il calcolo del contenuto in ceneri, seguendo la norma, è stata applicata la seguente formula:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (6.8)$$

- $A_d$  = contenuto in ceneri sul secco (d = dry basis)
  - $m_1$  = massa del crogiolo (tara)
  - $m_2$  = massa del crogiolo + il campione fresco (P1)
  - $m_3$  = massa del crogiolo + le ceneri (P3)
  - $M_{ad}$  = contenuto idrico (%) del campione usato per il calcolo delle ceneri
- (6.8)

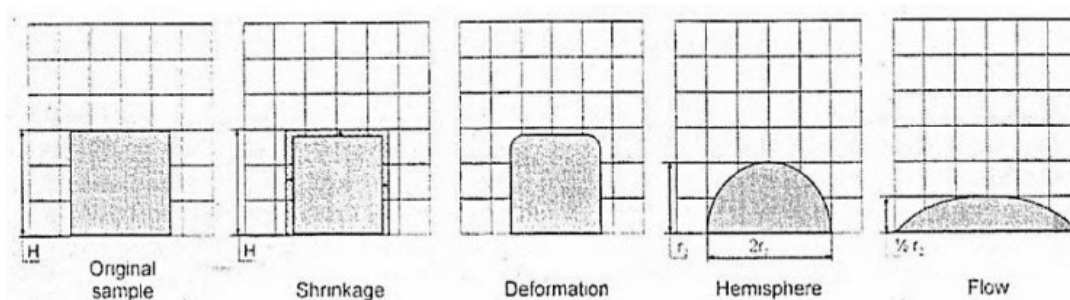
### 6.3.4 Fusibilità ceneri

La fusibilità delle ceneri è un parametro che nell'analisi di qualità dei biocombustibili è richiesto solamente per il pellet ma può eventualmente essere eseguita su qualsiasi biocombustibile. La norma di riferimento per questa analisi è la UNI EN ISO 21404: "Biocombustibili solidi - Determinazione del comportamento di fusione delle ceneri" 2020.

L'analisi ha permesso di stabilire il comportamento delle ceneri ad alte temperature (fusibilità) attraverso la determinazione di 4 temperature caratteristiche:

- Temperatura di contrazione (SST - Shrinkage): temperatura alla quale si ha la diminuzione di volume del campione, ma non modifiche di forma.
- Temperatura di deformazione (DT - Deformation): temperatura alla quale il campione subisce un arrotondamento degli angoli superiori.
- Temperatura emisferica (HT - Hemisphere): temperatura alla quale il campione assume una forma emisferica.
- Temperatura di fusione (FT - Flow): temperatura alla quale si ha la completa fluidificazione del campione.

La valutazione delle temperature di fusione delle ceneri è un dato fondamentale per prevenire fenomeni di accumulo ed incrostazione delle ceneri nelle parti interne dell'impianto di combustione.



**Figura 6.16:** Forme caratteristiche del campione utilizzato nelle prove di fusibilità delle ceneri secondo la norma UNI EN ISO 21404

Le ceneri utilizzate per la fusibilità sono state preparate in muffola ad 815°C e successivamente lavorate per riuscire a produrre dei cilindri di cenere di dimensione standard sui quali è stata eseguita l'analisi.



Per la creazione dei cilindri è stato necessario lavorare un miscuglio di ceneri, destrina e acqua. La destrina è un collante sottoforma di polvere la cui presenza non influisce sulle analisi. La destrina è stata unita all'acqua secondo un rapporto che prevede per ogni grammo di destrina 10 ml d'acqua. Il collante ottenuto è stato poi utilizzato per lavorare le ceneri, fino ad ottenere la consistenza voluta. Tramite l'apposito stampo si sono formati dei cilindri che sono stati adagiati su di un sostegno in zirconio.

Il supporto in zirconio è stato poi inserito all'interno di una speciale muffola laser in grado di raggiungere temperature molto elevate. La stufa impiegata è in grado di misurare costantemente la deformazione dei cilindri andando a misurare in maniera continuativa il diametro e l'altezza degli stessi. Per ogni fase, descritta sopra, la muffola è in grado di determinare in maniera autonoma la temperatura. Inoltre, la macchina è in grado di fotografare costantemente i diversi cilindri durante tutta la durata dell'operazione.



**Figura 6.17:** Cilindri di cenere su supporto in Zirconio (Foto: Pradel N., 2022)



**Figura 6.18:** Cilindri di cenere fusi (Foto: Pradel N., 2022)

#### 6.4 ANALISI RADIOATTIVITÀ

Come anticipato, l'analisi inerente alla radioattività e il contenuto di altri inquinanti all'interno dei campioni di cenere e di segatura di cippato è stata eseguita in differente sede, precisamente presso il laboratorio di radiochimica ambientale del CNR-ICMATE di Padova.

La metodologia applicata è utilizzata allo stesso modo per gli alimenti, per l'aria, per l'acqua o in questo caso per le biomasse. I campioni sono analizzati in laboratorio con strumenti estremamente sensibili e procedure complesse di cui ne è riportata solo una esemplificazione che non ha la pretesa di risultare esaustiva.

Le tecniche analitiche impiegate presso il laboratorio sono diverse, in particolare:

- spettrometria  $\gamma$  ad alta risoluzione con rivelatori al germanio intrinseco di radionuclidi gamma emettitori naturali (es. Ra-226 e prodotti di decadimento, Pb-210, K-40, Be-7) ed artificiali (es. Cs-137, Cs-134, I-131). Questo tipo di strumentazione consente la misura di diverse matrici (suoli, sedimenti, acque, biota, matrici alimentari, materiali da costruzioni etc) senza pretrattamento del campione;
- analisi mediante spettrometria  $\alpha$  ad alta risoluzione con rivelatori a semiconduttore a “barriera superficiale”; in particolare misura di Po-210 altamente ecotossico in acque e biota, pretrattati chimicamente e deposizione elettrolitica su supporto di Ag per la misurazione;
- studio di tecniche di misura esistenti e sviluppo di nuove metodiche di misura del gas radon in aria in ambienti interni ed esterni tramite: rivelatori a tracce, rivelatori ai carboni attivi, camere ad elettrode, misure in continuo tramite cella di Lucas; studio di tecniche di misure di emanazione dal suolo e di radon in acqua;
- analisi tramite scintillazione liquida di radionuclidi  $\beta$ -emettitori;
- analisi tramite spettrometria a fluorescenza di raggi X polarizzati a dispersione di energia (EDP-XRF), in riflessione totale (T-XRF) e messa a punto delle metodiche di misura della composizione elementare dei componenti maggiori, minori ed in traccia per matrici ambientali.

La precisione e l’affidabilità delle misure è consolidata inoltre dalla partecipazione a circuiti di inter-confronto a livello internazionale con l’analisi di standards e campioni incogniti dettagli che rendono il laboratorio leader assoluto del settore.

La tecnica utilizzata in questo caso, nonché una delle più diffuse nell’esecuzione di questa tipologia di analisi, è quella della spettrometria gamma ad alta risoluzione con rivelatori al germanio iperpuro (HPGe - High Purity Germanium) che permette di identificare e quantificare i radionuclidi naturali e artificiali gamma emittenti eventualmente presenti all’interno del campione analizzato. In alcuni casi è necessario adottare tecniche analitiche più articolate che prevedono una fase di pretrattamento chimico molto complicata e laboriosa che permette di isolare il radionuclide che si desidera misurare;

questa tecnica è necessaria, ad esempio, per la misura dell'uranio, del plutonio o dello Sr-90. L'unità di misura della radioattività è il Becquerel (Bq).

La preparazione di un campione risulta abbastanza semplice. Il campione dopo essere stato omogeneizzato, operazione spesso superflua soprattutto nel caso di campioni liquidi viene trasferito in recipienti di forma uguale, in genere cilindrica (figure 6.19 e 6.20).



**Figura 6.19:** Campione di cenere utilizzato per l'analisi di radioattività (Foto: Pradel N., 2022)



**Figura 6.20:** campioni di cenere conferiti presso il CNR ICMATE (Foto: Pradel N., 2022)

Ogni radionuclide emette radiazioni gamma diverse per forma ed energia, questo permette di individuare le differenti sostanze e di quantificarne la loro attività. Queste misurazioni avvengono all'interno di uno strumento le cui pareti sono rivestite in piombo, la durata della procedura per i campioni alimentari o in questo caso ambientali è di alcune ore.

Il sistema di spettrometria gamma è composto schematicamente da un rivelatore costituito da un cristallo di germanio iperpuro, raffreddato a circa 80k con azoto liquido e successivamente posizionato all'interno di un pozzetto di piombo il cui spessore risulta essere di 100 mm per schermare le radiazioni ambientali. Le principali caratteristiche dello spettrometro al Germanio sono riassunte nella tabella 4.

Numerosi sono i lavori portati a termine dal laboratorio in merito alla questione, va citato in quanto in linea con le finalità del presente elaborato il lavoro di Cantaluppi et al. (2015) in merito alle caratteristiche qualitative e contaminazione radioattiva di alcune partite di pellet importate in Italia, nelle righe successive ne verrà riportato un breve estratto.

**Tabella 6.3:** Caratteristiche dello strumento utilizzato per le analisi di radioattività.

<b>Caratteristiche</b>	<b>Valore</b>
Rilevatore tipo	Coaxial, N-type, con Be window
Costruttore	Canberra
Diametro	53,5 mm
Lunghezza	53,0 mm
Distanza tra il rilevatore Ge e Be Window	5 mm
FWHM	0,81 keV
FWHM	1,73 keV
Picco di Compton	55,9/1 (a 1332 keV)
Efficienza relativa	25,3% (a 1332 keV)
Tensione di depotenziamento	- 2500 V
Tensione raccomandata	- 4000 V

Il lavoro citato precedentemente per i suoi contenuti è molto simile a quello di Zambelli et al. (2018) e riportato nel capitolo 4.

Anche questo scritto allude alle diverse partite di pellet contaminato dai radionuclidi rinvenute a partire dal giugno del 2009. Infatti, il team di ricerca si è occupato di investigare circa la provenienza di 65 campioni di pellet provenienti da foreste dell'est Europa, ovvero zone abbondantemente contaminate dalle radiazioni nucleari. Molti dei campioni hanno mostrato contenuti di Cs-137 molto bassi, solamente alcuni campioni hanno dimostrato invece una concentrazione superiore ai 100 Bq kg<sup>-1</sup>. Lo studio ha comunque dimostrato che i valori registrati, per ben bassi che fossero, che i radionuclidi contenuti nel pellet ad uso domestico non rappresentano un problema per la salute dell'uomo in quanto al di sotto della soglia massima di tollerabilità. Lo studio è volto anche a rivelare l'efficacia del metodo applicato nel determinare il contenuto di radionuclidi all'interno di biomasse legnose.

I campioni analizzati sono stati complessivamente 30, di cui 27 riferiti alle ceneri prodotte dalla combustione del cippato e solamente 3 i campioni di cippato tal quale.

## 6.5 ELABORAZIONE STATISTICA

I dati ottenuti durante le prove condotte in laboratorio sono stati successivamente sottoposti ad un'analisi statistica descrittiva e interferenziale multifattoriale ad una via del tipo ANOVA. Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato l'applicativo *Statgraphics Centurion 19* mentre, per le figure di tipo grafico è stato utilizzato *Microsoft Excel 2020*. L'analisi statistica ha previsto l'elaborazione di una serie di variabili ampiamente descritte nei capitoli precedenti e riguardano il contenuto idrico, il potere calorifico, il contenuto in ceneri e la fusibilità delle ceneri stessa.

Inizialmente l'analisi ha riguardato l'analisi della variabilità tra le ripetizioni effettuate per ogni singolo parametro analizzato in laboratorio che per ciascun campione analizzato, questo per poter valutare l'influenza dell'errore sistematico degli strumenti di misura utilizzati e della disomogeneità interna del campione macinato e non impiegato nelle analisi. I parametri sono stati analizzati in funzione del settore forestale di provenienza del campione.

Per ciascuno dei confronti è stata eseguita successivamente un'analisi ad una via ANOVA (Analysis Of VAriance), ciò al fine di testare le differenze tra le diverse medie campionarie prendendo in considerazione le rispettive varianze.

L'analisi effettuata scompone la variabilità dei dati osservati in due componenti, ovvero la variabilità tra i gruppi, che identifica le differenze tra i diversi campioni di cippato e la variabilità all'interno del gruppo stesso.

In sintesi, l'analisi della varianza (ANOVA) a una via è un metodo statistico per testare le differenze tra le medie di tre o più gruppi. L'analisi della varianza a una via in genere viene usata quando, come in questo caso, si possiede un'unica variabile indipendente, o fattore, e si vuole verificare se eventuali variazioni o diversi livelli di tale fattore abbiano un effetto misurabile su una variabile dipendente (Borelli, 2016).

L'analisi della varianza (Anova = Analysis of variance) è una procedura statistica che consente di individuare se vi siano delle differenze tra più gruppi di dati, a differenza del test t di Student il quale invece, per natura 'matematica', può esplorare solo ciò che accade tra due gruppi (Borelli, 2016).

Per i confronti condotti è stata determinato un livello di significatività statistica pari a  $\alpha = 0,05$ . Successivamente con l'analisi dei valori di Fisher ricavati è stato possibile accettare o rifiutare l'ipotesi nulla che le medie campionarie dei gruppi siano uguali tra

di loro. Per ogni confronto è stato determinato il *P-value*, ovvero la probabilità stimata di rifiuto dell'ipotesi nulla di uguaglianza tra i gruppi, ciò al fine di evidenziare la variabilità dei gruppi stessi. Qualora il valore del *P-value* sia basso, ovvero inferiore al valore prefissato di 0,05, vi è la necessità di analizzare le medie campionarie dei diversi campioni per definire quali siano le medie che risultato significativamente diverse dalle altre. Per perseguire quest'ultimo obiettivo si utilizza il test post-hoc dei range multipli. Questo test permette di identificare dei sottoinsiemi omogenei di medie che non differiscono le une dalle altre. Infine, mediante la comparazione a coppie multiple è possibile verificare la differenza che esiste tra ciascuna coppia di medie ottenendo così, attraverso una matrice all'interno della quale sono evidenziate le medie di gruppo con differenze significative ed un livello di  $\alpha = 0,05$  (IBM,2013). In questo caso è stato utilizzato il metodo LSD (*Least Significant Difference*) di Fisher, il quale individua intervalli scalati così che possa scegliere una coppia di campioni e stabilire che le loro medie sono significativamente differenti se gli intervalli non si sovrappongono nella direzione verticale (Statgraphics, 2017).

È stato scelto di approfondire maggiormente le analisi statistiche sulle ceneri in quanto più direttamente correlate con il contenuto di sostanze radioattive o altri elementi inquinanti. Infatti, è bene ricordare che uno degli obiettivi principali del presente elaborato è proprio quello di investigare l'eventuale contenuto di sostanze radioattive all'interno delle ceneri del cippato.

Per quanto riguarda l'analisi del contenuto radioattivo all'interno della segatura di cippato, avendo solamente tre valori, non è stato possibile sottoporre questo parametro ad elaborazione statistica ma sono stati riportati comunque i valori sottoforma tabellare per conoscenza e completezza.

## 6.6 INTERPOLAZIONE IDW

Al fine di rappresentare visivamente a livello provinciale i risultati della radioattività ottenuti è stato applicato il metodo IDW (*Inverse Distance Weighting*).

Questo metodo, attraverso l'applicativo QGIS è in grado di interpolare spazialmente e riportare in forma grafica i valori di radioattività ottenuti per i differenti 27 campioni.

L'interpolazione ha la funzione di estendere i risultati ottenuti ad un territorio circoscritto partendo da dati puntuali di cui è noto il valore di una determinata variabile, nel caso specifico di Cs-137.

I dati puntuali di valore noto permettono di estendere e stimare i risultati su di un'area della quale si vuole conoscere il valore di una variabile che per quel punto è sconosciuta. Attraverso l'impiego di GIS è possibile creare un'immagine raster, ovvero un insieme di pixel ad ognuno dei quali verrà assegnato un valore stimato partendo dal dato di valore noto. Ripetendo la procedura per ognuno dei 27 punti di campionamento è possibile costruire una superficie continua su di un'area circoscritta allo scopo di creare un'ulteriore maglia di punti alla quale è questa volta assegnato un valore compreso tra il minimo e il massimo dei valori noti.

Il funzionamento risulta in effetti piuttosto banale ma molto significativo da un punto di vista rappresentativo in quanto ad ogni pixel è corrisposto un valore e successivamente un colore sulla base delle medie ponderate in base alla distanza dei punti più vicini. Tale metodo, come accennato, è definito *Inverse Distance Weighted* e fa parte della vasta gamma di procedure di interpolazione, questo metodo restituisce un peso maggiore al valore della variabile nota più vicina al pixel preso in considerazione.

## **7 RISULTATI E DISCUSSIONE**

I campioni analizzati sono stati 27, appartenenti ai 9 Distretti Forestali della Provincia Autonoma di Trento in maniera da garantire una certa copertura del territorio provinciale. Come premessa, bisogna ricordare il fatto che i campioni recuperati sono stati oggetto di una pianificazione preliminare che è stata adattata in base all'effettiva disponibilità di cantieri nelle zone di campionamento previste.

Tutti i campioni analizzati sono costituiti in maniera prioritaria da cippato di *Picea abies* ad esclusione di alcuni che invece presentano una quota maggiore di cippato prodotto a partire da altre conifere come *Pinus nigra*, *Pinus sylvester* ed eccezionalmente qualche residuo di latifoglia.

Sulla base di quanto esposto precedentemente, sono di seguito riportati sinteticamente i risultati delle analisi svolte presso il laboratorio Analisi Biocombustibili e i risultati elaborati dal laboratorio CNR-ICMATE.

### **7.1 RIASSUNTO DEI RISULTATI OTTENUTI ATTRAVERSO LE ANALISI QUALITATIVE DEL CIPPATO**

Di seguito vengono riportati sinteticamente in forma grafica le analisi qualitative del cippato. Tali risultati, che hanno lo scopo di illustrare i risultati ottenuti in laboratorio, verranno utilizzati successivamente per l'elaborazione statistica allo scopo di rendere più intellegibili le analisi effettuate.

#### **7.1.1 Contenuto idrico**

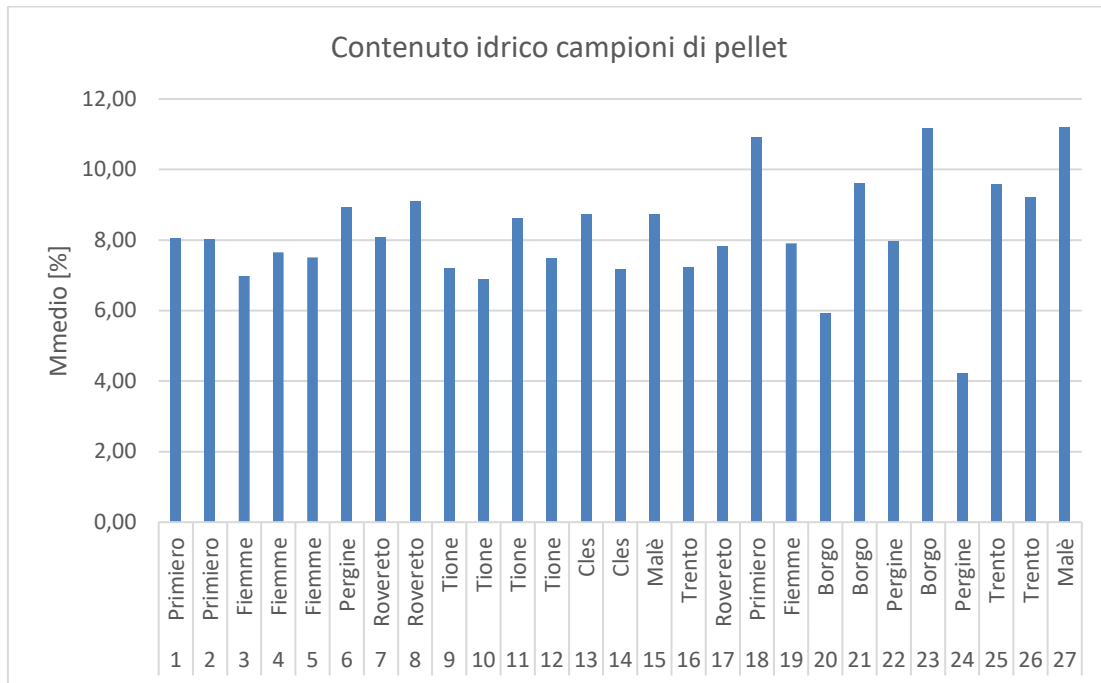
I valori riportati e rappresentati graficamente sono stati calcolati come indicato nel capitolo 6 "Materiali e Metodi" attraverso la formula 6.3.

Questo parametro, come anticipato nel precedente capitolo, è utile soprattutto nella stima del potere calorifico inferiore attraverso le formule 6.5 e 6.7 considerate nel capitolo precedente.

Come si nota il contenuto idrico tra i diversi campioni risulta piuttosto variabile nonostante sia stato condizionato manualmente per la produzione del pellet. I valori si discostano in relazione al fatto che la produzione è avvenuta in differenti condizioni ambientali e climatiche; infatti, essendo i campioni preparati in differenti giornate le



condizioni meteorologiche, soprattutto legate all'umidità dell'aria hanno influito in maniera importante sull'assorbimento idrico da parte della segatura, questo si ripercuote in valori di contenuto idrico piuttosto variabili.



**Figura 7.1:** Contenuto idrico dei campioni di pellet

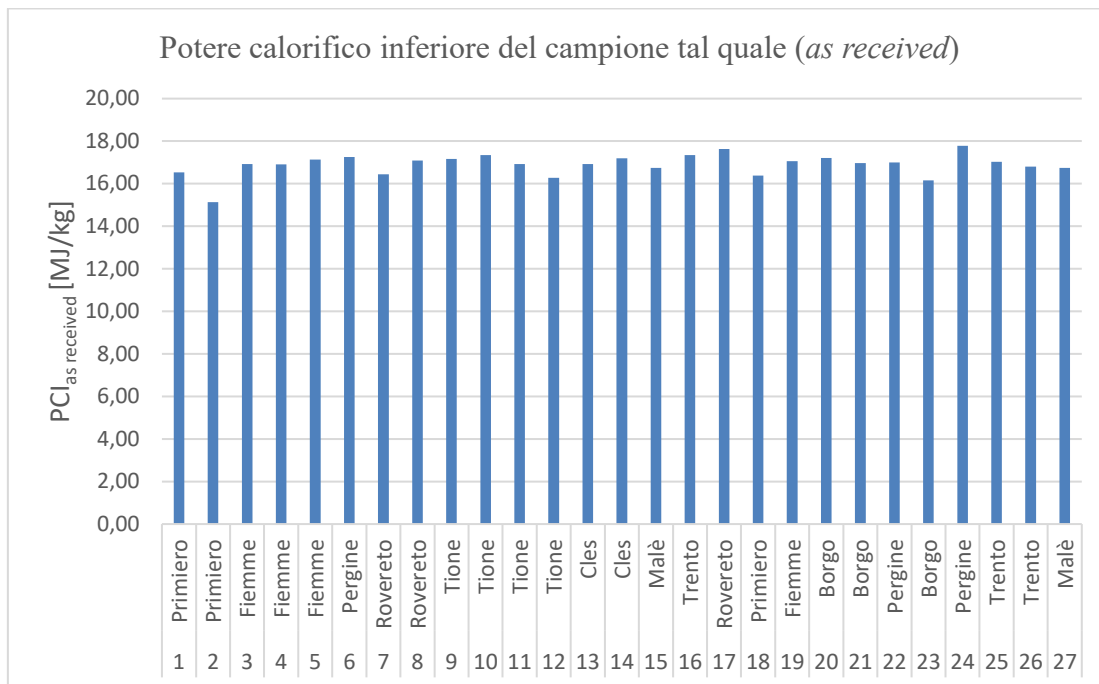
### 7.1.2 Potere calorifico

Il potere calorifico è un parametro che identifica la capacità della biomassa di esprimere calore. Possiamo distinguere tale parametro in due tipologie, entrambe calcolate partendo dal dato ottenuto attraverso le prove di laboratorio.

La prima categoria appartiene al potere calorifico superiore, ovvero il potere calorifico che tiene conto del calore latente di vaporizzazione dell'acqua. La seconda categoria fa invece riferimento al potere calorifico inferiore, che viceversa non tiene conto del calore latente legato all'evaporazione dell'acqua.

Per entrambe le categorie possiamo distinguere due sottocategorie, nello specifico il potere calorifico del campione asciutto (*dry*), ovvero il campione trattato in laboratorio con un procedimento di macinazione ed essiccazione, il campione raggiunto lo stato anidro assume un valore di contenuto idrico conformandosi all'ambiente circostante.

La seconda categoria identifica invece il potere calorifico legato al campione tal quale (*as received*) e dunque al campione "umido" e rappresenta l'approssimazione più vicina al campione originario.



**Figura 7.2:** Potere calorifico medio dei campioni di cippato

Anche in questo caso si denota una certa variabilità all'interno dei campioni seppur non così marcata come invece accade per gli altri parametri qualitativi.

Come anticipato, i valori del potere calorifico appartengono a differenti categorie. Il focus delle analisi è rivolto al Potere Calorifico Inferiore del campione tal quale (*as received*) in quanto, secondo la normativa, è il valore richiesto per le analisi di qualità ed esprime la capacità effettiva del biocombustibile acquistato di manifestarsi in calore.

### 7.1.3 Contenuto in ceneri

I valori riportati nella precedente tabella sono stati calcolati come indicato nel capitolo 6 “Materiali e Metodi” attraverso la formula 6.8.

Nel grafico sottostante, sono illustrati invece gli stessi valori in forma grafica per una maggior intellegibilità. Come si vede, i valori sono tra loro molto diversi, questo denota il fatto che il cippato campionato, per quanto prodotto partendo principalmente da *Picea abies*, sia in realtà molto eterogeneo nella qualità. Il contenuto di ceneri è influenzato notoriamente dalla presenza di terra, aghi e altri agenti inquinanti presenti all'interno del cippato che vanno ad influire negativamente sul contenuto in ceneri, ovvero una minore pulizia del materiale di partenza si ripercuote in un maggior contenuto in ceneri.

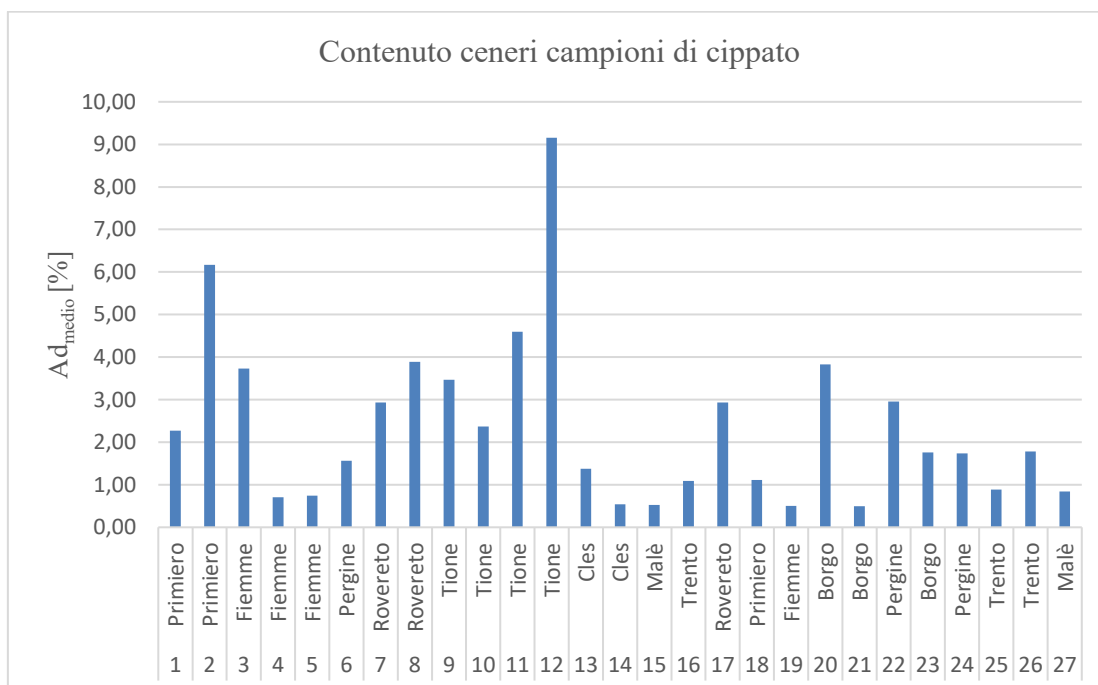


Figura 7.3: Contenuto in ceneri dei campioni di cippato

#### 7.1.4 Fusibilità delle ceneri

Tabella 7.1: Fusibilità delle ceneri di cippato

CAMPIONE	Temperatura			
	SST °C	DT °C	HT °C	FT °C
1	1209	1219	1249	1256
2	1186	1207	1252	1267
3	1187	1202	1227	1244
4	1271	1281	1293	1321
5	1244	1254	1273	1278
6	1273	1287	1302	1316
7	1280	1362	1498	>1500
8	1241	1306	1436	1488
9	1300	1364	1471	1494
10	1267	1281	1301	1308
11	1229	1239	1268	1276
12	1193	1202	1231	1242
13	1317	1340	>1500	>1500
14	1250	1270	1303	1313
15	1262	1271	1294	1300
16	1252	1262	1284	1290
17	1316	1350	1415	1444
18	1284	1314	1374	1400
19	1346	1387	>1500	>1500
20	1293	1302	1412	1440
21	1171	1290	1495	>1500
22	1175	1289	>1500	>1500
23	1179	1262	>1500	>1500
24	1274	1328	>1500	>1500
25	1286	1318	1406	1422
26	1198	1215	1239	1248
27	1269	1281	1317	1364

La fusibilità delle ceneri è un parametro molto importante nei biocombustibili in quanto permette di stabilire la temperatura alla quale le ceneri, accumulate all'interno degli apparecchi di combustione, industriali e non, si fondono creando diversi problemi.

La valutazione delle temperature di fusione delle ceneri è un dato fondamentale per prevenire fenomeni di accumulo ed incrostazione delle ceneri nelle parti interne

dell'impianto di combustione. La formazione di aggregati stabili può condurre l'utente a fermare l'impianto per pulire alcune parti interne (bruciatore, camera di combustione, scambiatore, ecc.). L'impianto termico che accumula ceneri al proprio interno può andare incontro al malfunzionamento di alcuni suoi componenti mobili, alla riduzione di efficienza energetica per ridotto scambio termico e a fenomeni di deterioramento di alcune parti. La tendenza a fondere a basse temperature è tipica di alcune biomasse ed è dipendente dalla composizione chimica della frazione inorganica (Berti, 2021).

## **7.2 ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI DI LABORATORIO**

I dati raccolti durante le prove di laboratorio sono stati successivamente utilizzati per eseguire un'analisi statistica mediante il software *Statgraphics Centurion 19*. Nelle prossime pagine vengono riportate le elaborazioni statistiche per i gruppi di campioni analizzati secondo i 4 parametri fisico-meccanici presentati nei precedenti capitoli.

In tal senso non si intende cercare una correlazione forzata tra il contenuto in radionuclidi e la qualità del cippato ma solamente mettere in luce le caratteristiche di ognuno dei campioni in maniera tale che meglio possa interpretarsi il risultato riguardante la radioattività.

### **7.2.1 Contenuto idrico**

Per quanto riguarda questo parametro, l'elaborazione statistica è meno approfondita rispetto gli altri parametri in quanto il contenuto idrico come già anticipato è stato influenzato manualmente al fine di produrre il pellet necessario alla produzione di cenere. Viene dunque riportata una sintesi di quelli che sono i valori medi di ogni campione considerando il distretto di appartenenza come fattore distintivo e ovviamente il contenuto idrico come variabile.

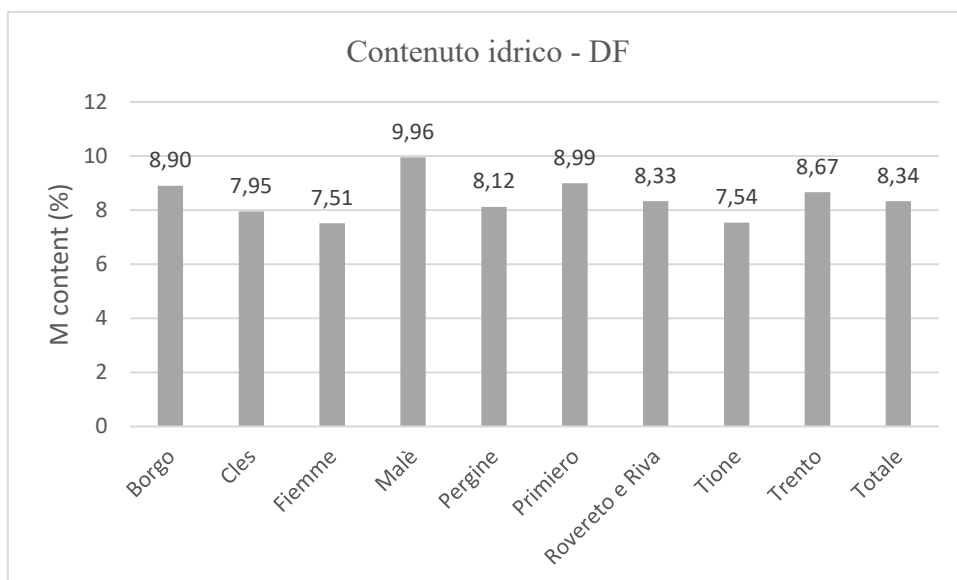
**Tabella 7.2a:** Statistiche di sintesi per il contenuto idrico

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
Borgo	9	8,9	3,068	34,490	5,6	13,57	7,97
Cles	6	7,95	0,847	10,666	7,17	8,79	1,62
Fiemme	12	7,51	0,355	4,7343	6,94	7,96	1,02
Malè	6	9,96	1,353	13,586	8,68	11,23	2,55
Pergine	9	8,12	0,644	7,9345	7,35	8,94	1,59
Primiero	9	8,99	1,436	15,974	7,99	10,97	2,98
Rovereto	9	8,33	0,588	7,063	7,77	9,16	1,39
Tione	12	7,54	0,681	9,0348	6,79	8,64	1,85
Trento	9	8,67	1,100	12,697	7,16	9,73	2,57
<b>Totale</b>	81	8,34	1,446	17,355	5,6	13,57	7,97

**Tabella 7.2b:** Tabella ANOVA per il contenuto idrico

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	40,57	8	5,07	2,88	0,0078
Intra-gruppo	126,87	72	1,76		
Totale (corr.)	167,44	80			

Dalla presente analisi statistica, in linea con quanto detto precedentemente, il contenuto idrico dei campioni di pellet risulta piuttosto eterogeneo. L'eterogeneità, come anticipato, è prevedibile in quanto le condizioni di operatività durante le quali è stato prodotto il pellet erano piuttosto variabili. Dal grafico sottostante si nota come a livello di distretto si possa però ritenere il pellet prodotto a partire dal cippato relativamente omogeneo, infatti mediamente il contenuto idrico si attesta nell'ordine dell'8%. Il valore di F riportato in tabella 7.2b assume un valore di 2,88. Quest'ultimo dato, nonostante sia comunque leggermente superiore all'unità indica che vi è comunque una certa omogeneità tra le medie dei differenti gruppi considerati, ovvero i differenti Distretti Forestali.



**Figura 7.4:** Contenuto idrico del pellet nei differenti Distretti Forestali

## 7.2.2 Potere calorifico

Uno dei parametri più importanti per il raggiungimento di un determinato livello qualitativo di un biocombustibile legnoso è certamente il potere calorifico. Precisamente, secondo la normativa UNI EN ISO 17225-1:2021 e UNI EN ISO 17225-2 :2021 viene considerato il potere calorifico inferiore del campione tal quale (*as received*) al fine di determinarne la qualità ed è proprio su quest'ultimo parametro che è stata operata l'analisi statistica.

**Tabella 7.3a:** Statistiche di sintesi per il potere calorifico

ID campione	Conteggio	Media (MJ/kg)	Dev. Standard (MJ/kg)	Coef. di variazione (MJ/kg)	Minimo (MJ/kg)	Massimo (MJ/kg)	Range (MJ/kg)
Borgo	9	16,78	0,553	3,29	16,15	17,20	1,07
Cles	6	16,86	0,471	2,79	16,52	17,19	0,67
Fiemme	12	17,01	0,110	0,65	16,91	17,14	0,22
Malè	6	16,75	0,002	0,01	16,74	16,74	0,004
Pergine	9	17,34	0,399	2,28	16,99	17,77	0,78
Primiero	9	16,01	0,762	4,76	15,14	16,53	1,39
Rovereto	9	17,06	0,593	3,47	16,44	17,63	1,19
Tione	12	16,93	0,471	2,78	16,27	17,35	1,08

Trento	9	17,06	0,270	1,58	16,80	17,34	0,54
<b>Totale</b>	81	16,88	0,522	3,09	15,14	17,77	2,63

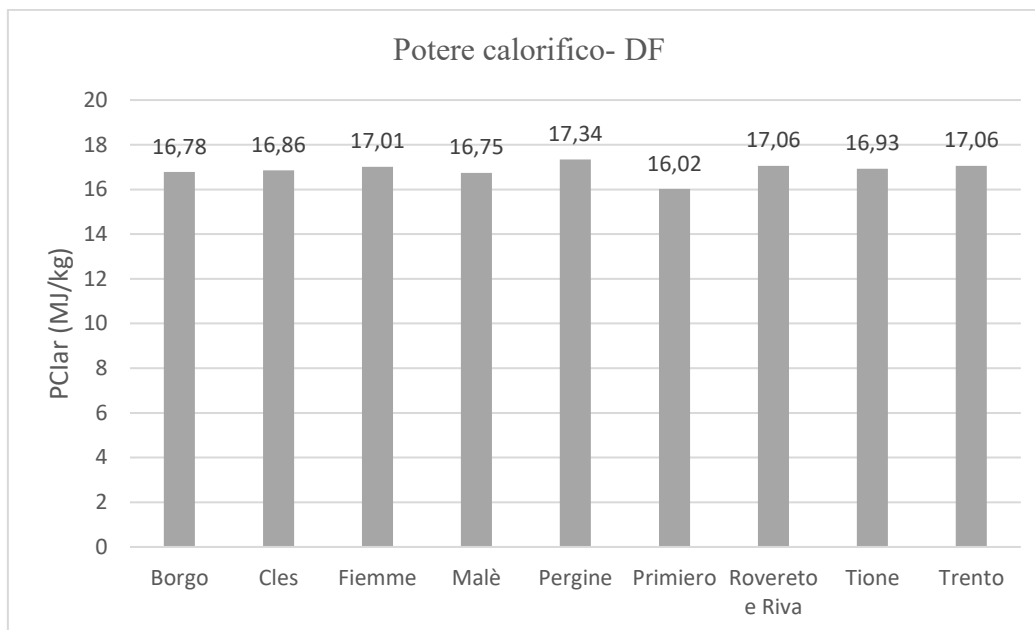
Di seguito è riportata la tabella ANOVA che scompone la varianza del Potere Calorifico Inferiore in due componenti, una componente intra-gruppo e una componente tra i gruppi. Il rapporto F in questo caso pari a 1,87188 è un rapporto tra la stima tra i gruppi e la stima intra-gruppo. In questo caso, a differenza dei parametri quali il contenuto in ceneri e il contenuto idrico, il valore di *P-value* del test F è maggiore o uguale a 0,05. Quest'ultimo dato indica il fatto che non c'è una differenza statisticamente significativa tra le medie del Potere Calorifico nei diversi Distretti. Questo risultato è piuttosto plausibile in quanto il potere calorifico si rifà semplicemente al calore sprigionato dalla combustione della sostanza organica contenuta nella biomassa, dunque trattandosi principalmente di legno di *Picea abies* ci si sarebbe comunque aspettati il fatto che i valori non si discostassero in maniera importante.

**Tabella 7.3b:** Tabella ANOVA per il potere calorifico

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	3,217	8	0,402	1,87	0,1283
Intra-gruppo	3,867	18	0,214		
Totale (corr.)	7,084	26			

In questo caso, considerato il valore del *P-value*, non si rende necessario procedere ad ulteriori test statistici circa il test dei range multipli per identificare quali medie dei campioni siano statisticamente differenti dalle altre.





**Figura 7.5:** Potere calorifico del cippato nei differenti Distretti Forestali

### 7.2.3 Contenuto di ceneri

Come anticipato, tale parametro verrà maggiormente investigato in relazione al fatto che l'eventuale contenuto in radionuclidi, nello specifico di Cs-137 dovrebbe essere contenuto all'interno delle ceneri prodotte dalla combustione.

#### Distretto 1 – Primiero

Nella tabella 7.2 sono riportati i risultati delle analisi statistiche riguardanti il contenuto in ceneri per il gruppo di campioni appartenenti al Distretto Forestale di Primiero. Il valore medio dei 3 campioni analizzati è pari a 3,18%; tale valore, come del resto anche gli altri valori ottenuti nei diversi Distretti Forestali, rispecchia quella che è l'eterogeneità dei campioni analizzati in quanto il cippato è stato prodotto in situazioni e contesti differenti.

I campioni presentano infatti una forte variabilità con un valore minimo riscontrato del 1,04% ed un valore massimo del 6,23%. Per quanto riguarda invece la deviazione standard è possibile invece notare come la variabilità interna sia invece piuttosto contenuta.

**Tabella 7.4a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Primiero

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
1	3	2,27	0,047	2,08	2,23	2,32	0,09
2	3	6,17	0,06	0,972	6,11	6,23	0,12
18	3	1,11	0,087	7,847	1,04	1,21	0,17
<b>Totale</b>	9	3,18	2,295	72,117	1,04	6,23	5,19

La tabella ANOVA di seguito riportata scinde invece la varianza dei dati in due componenti: una componente tra gruppi ed una intra-gruppo (Tabella 7.7b). Il rapporto di Fisher (F) che è uguale a 4693 indica un rapporto fra la stima tra i diversi gruppi e la stima intra-gruppo. Quando il valore, come in questo caso, risulta di molto superiore a 1 significa che la variabilità tra le medie dei gruppi è maggiore di quella attesa per l'effetto del caso (Whitlock e Schuter, 2014).

Poiché il *P-value* del test F è minore di 0,05, c'è una differenza statisticamente significativa tra la media del contenuto in ceneri da un campione all'altro con un livello di significatività del 5%. Infatti, quando il *P-value* della tabella ANOVA assume valori molto bassi, si devono determinare le medie dei campioni per determinare quali di queste siano significativamente diverse dalle altre (Statgraphics, 2017).

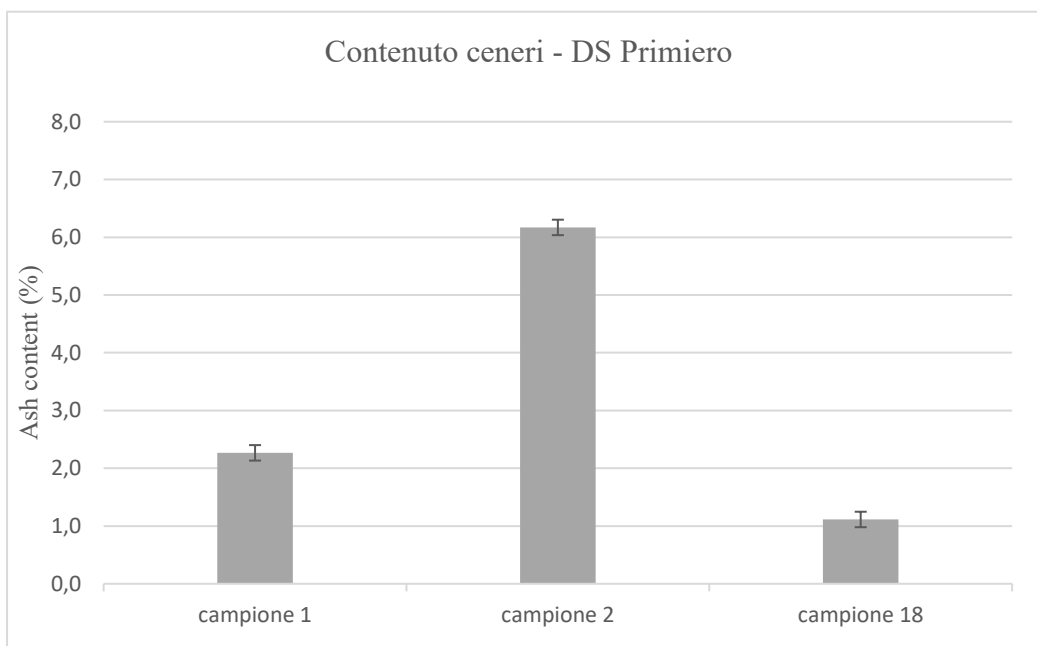
**Tabella 7.4b:** Tabella ANOVA per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Primiero

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	42,136	2	21,068	4693	0,0000
Intra-gruppo	0,0269	6	0,0044		
Totale (corr.)	42,163	8			

L'analisi della varianza non fornisce indicazione alcuna di quali siano i gruppi uguali o differenti dagli altri, essa infatti rileva solamente la differenza dei gruppi in termini di varianza. Per determinare quali medie dei campioni siano statisticamente differenti dalle altre è necessario effettuare un test post-hoc. Per perseguire quest'ultimo fine è stato infatti eseguito il test dei range multipli e nello specifico il metodo utilizzato per la discriminazione della media è la procedura LSD di Fisher. Con questo metodo è presente

un rischio del 5,0 % di affermare che ciascuna copia di medie significativamente differenti quando invece la differenza reale è 0. Questo prevede la determinazione di un intervallo LSD sulla base del quale individuare la presenza di gruppi omogenei. In questo caso, il valore dell'intervallo risulta essere pari a  $\pm 0,133858$ .

Il risultato dell'analisi è ben evidenziato nella figura sottostante che riporta graficamente i valori ottenuti attraverso i quali apprezzare le differenze tra i diversi campioni. In particolare, il campione 2 si discosta maggiormente dai campioni 1 e 18.



**Figura 7.6:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Primiero e intervalli LSD

#### Distretto 2 – Fiemme

Nella tabella 7.8a sono riportati i risultati delle analisi statistiche riguardanti il contenuto in ceneri per il gruppo di campioni appartenenti al Distretto Forestale di Fiemme. Il valore medio dei 4 campioni analizzati è pari a 1,42%; anche in questo caso il valore rispecchia l'eterogeneità dei campioni analizzati.

Anche in questo caso i campioni presentano infatti una forte variabilità con un valore minimo riscontrato del 0,47% ed un valore massimo del 3,89%. La deviazione standard rimane ancora una volta piuttosto contenuta.

**Tabella 7.5a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Fiemme

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
3	3	3,73	0,141	3,80	3,62	3,89	0,27
4	3	0,71	0,041	5,71	0,67	0,75	0,08
5	3	0,74	0,025	3,38	0,72	0,77	0,05
19	3	0,5	0,049	9,80	0,47	0,56	0,09
<b>Totale</b>	12	1,42	1,397	98,34	0,47	3,89	3,42

Ancora una volta la tabella ANOVA di seguito riportata scinde invece la varianza dei dati in due componenti: una componente tra gruppi ed una intra-gruppo (Tabella 4.2). Il rapporto di Fisher (F) che è uguale a 1152 indica un rapporto fra la stima tra i diversi gruppi e la stima intra-gruppo. Essendo il valore molto superiore ad la variabilità tra le medie dei gruppi è maggiore di quella attesa per l'effetto del caso (Whitlock e Schuter, 2014).

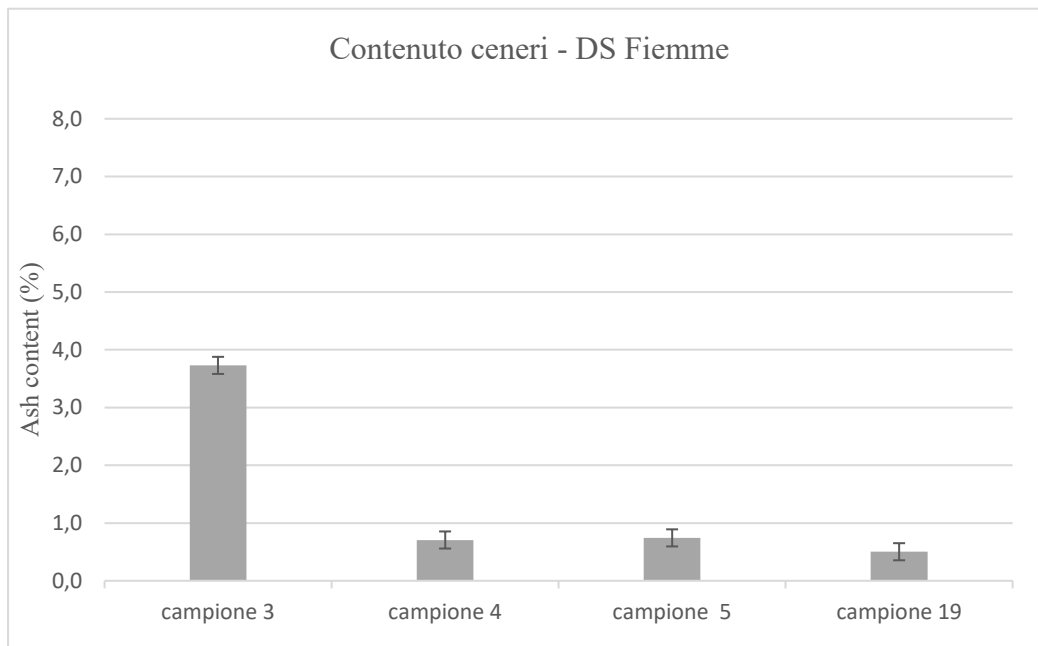
Poiché il P-value del test F è minore di 0,05, c'è una differenza statisticamente significativa tra la media del contenuto in ceneri da un campione all'altro con un livello di significatività del 5%. Infatti, quando il P-value della tabella ANOVA assume valori molto bassi, si devono determinare le medie dei campioni per determinare quali di queste siano significativamente diverse dalle altre (Statgraphics, 2017).

**Tabella 7.5b:** Tabella ANOVA per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Pergine

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	21,429	3	7,14	1152	0,0000
Intra-gruppo	0,049	8	0,00		
Totale (corr.)	21,748	11			

Anche in questo caso, apprezzata la differenza riscontrabile tra i diversi campioni analizzati è stato eseguito il test dei range multipli al fine di individuare l'intervallo LSD di Fisher che identifica il discostamento delle medie. In questo caso, il valore assunto dell'intervallo LSD è pari a  $\pm 0,148256$ .

Di seguito è riportato in forma grafica il contenuto in ceneri dei diversi campioni provenienti dal Distretto di Fiemme.



**Figura 7.7:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Fiemme e intervalli LSD

Notata la tendenza generale all'interno del distretto, ovvero una marcata eterogeneità tra i diversi campioni ma al contempo una forte omogeneità all'interno delle prove del campione stesso si riportano sottoforma tabellare e grafica le tabelle di sintesi e la tabella ANOVA degli altri 7 distretti senza indugiare in ulteriori delucidazioni di tipo statistico.

Distretto 3 – Pergine

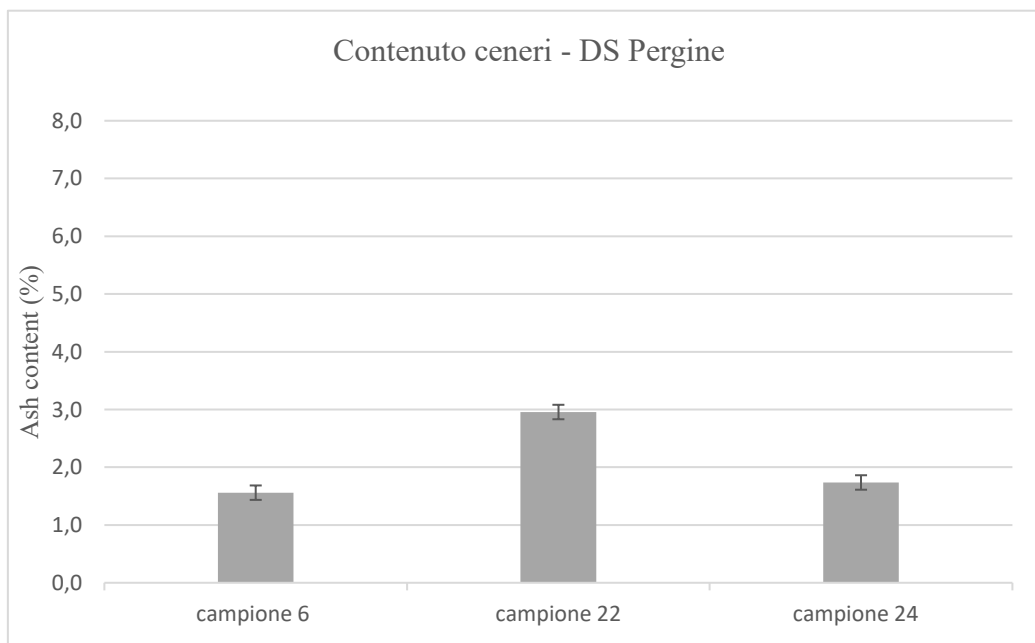
**Tabella 7.6a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Pergine

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
6	3	1,56	0,046	2,937	1,52	1,61	0,09
22	3	2,97	0,095	3,214	2,86	3,05	0,19
24	3	1,74	0,025	1,44	1,71	1,76	0,05
<b>Totale</b>	<b>9</b>	<b>2,08</b>	<b>0,660</b>	<b>31,70</b>	<b>1,52</b>	<b>3,05</b>	<b>1,53</b>

**Tabella 7.6b:** Tabella ANOVA per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Pergine

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	3,470	2	1,735	442,39	0,0000
Intra-gruppo	0,024	6	0,0039		
Totale (corr.)	3,494	8			

Anche per questo distretto, seppur in maniera meno marcata esiste una certa eterogeneità tra i diversi campioni che invece non sussiste all'interno dei campioni stessi.



**Figura 7.8:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Pergine e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,125124$ .

Distretto 4 – Rovereto e Riva del Garda

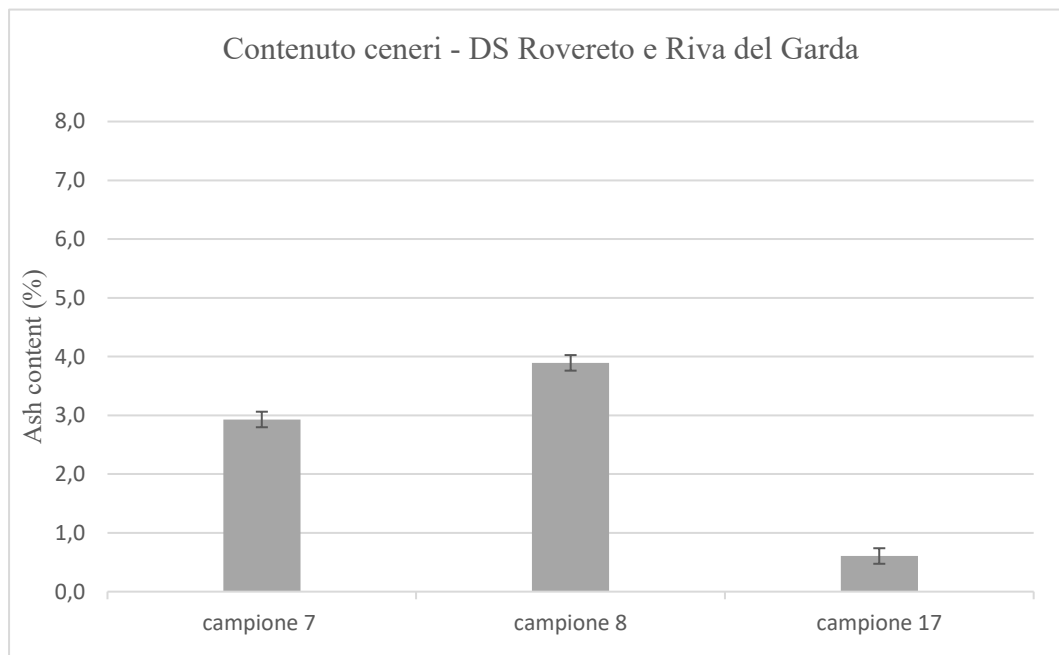
**Tabella 7.7a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Rovereto e Riva del Garda

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
7	3	2,93	0,095	3,256	2,84	3,03	0,19
8	3	3,89	0,038	0,972	3,85	3,92	0,07
17	3	0,61	0,051	8,458	0,55	0,65	0,1
<b>Totale</b>	9	2,47	1,464	59,125	0,55	3,92	3,37

**Tabella 7.7b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Rovereto e Riva del Garda

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	17,128	2	8,5640	1951,30	0,0000
Intra-gruppo	0,0263	6	0,0043		
Totale (corr.)	17,154	8			

**Figura 7.9:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Rovereto e Riva e intervallo LSD



Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,132358$ .

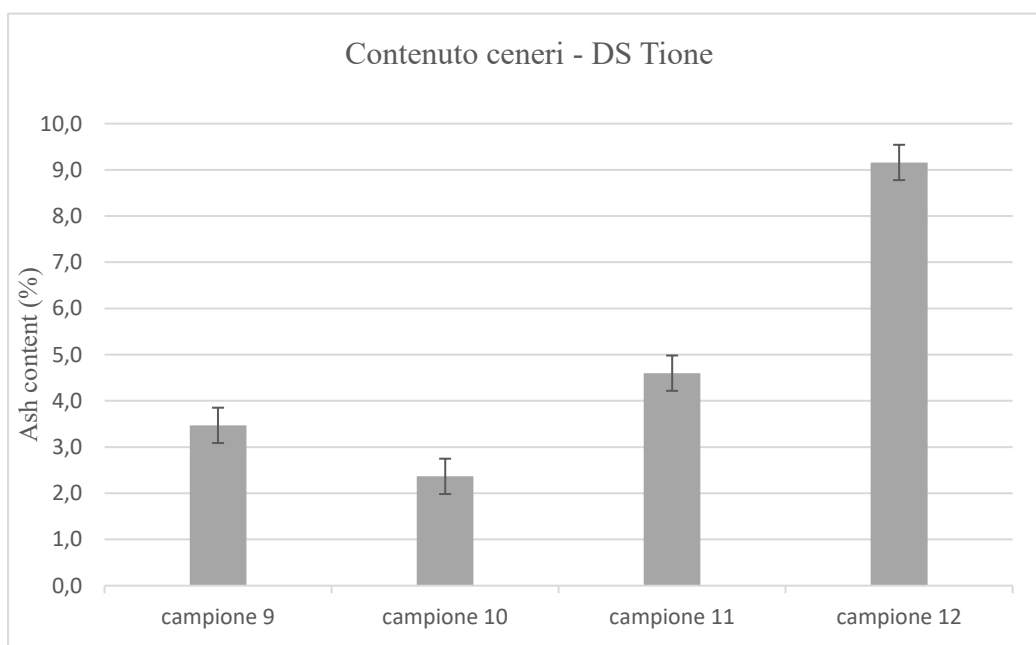
Distretto 5 – Tione

**Tabella 7.8a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Tione

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
9	3	3,47	0,294	8,490	3,13	3,65	0,52
10	3	2,37	0,189	7,998	2,15	2,5	,035
11	3	4,6	0,144	3,135	4,48	4,76	,028
12	3	9,16	0,147	1,608	9,0	9,29	,029
<b>Totale</b>	9	4,899	2,704	55,19	2,15	9,29	7,14

**Tabella 7.8b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Tione

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	80,1008	3	26,700	646,76	0,0000
Intra-gruppo	0,330267	8	0,0412		
Totale (corr.)	80,4311	11			



**Figura 7.10:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Tione e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,382563$ .



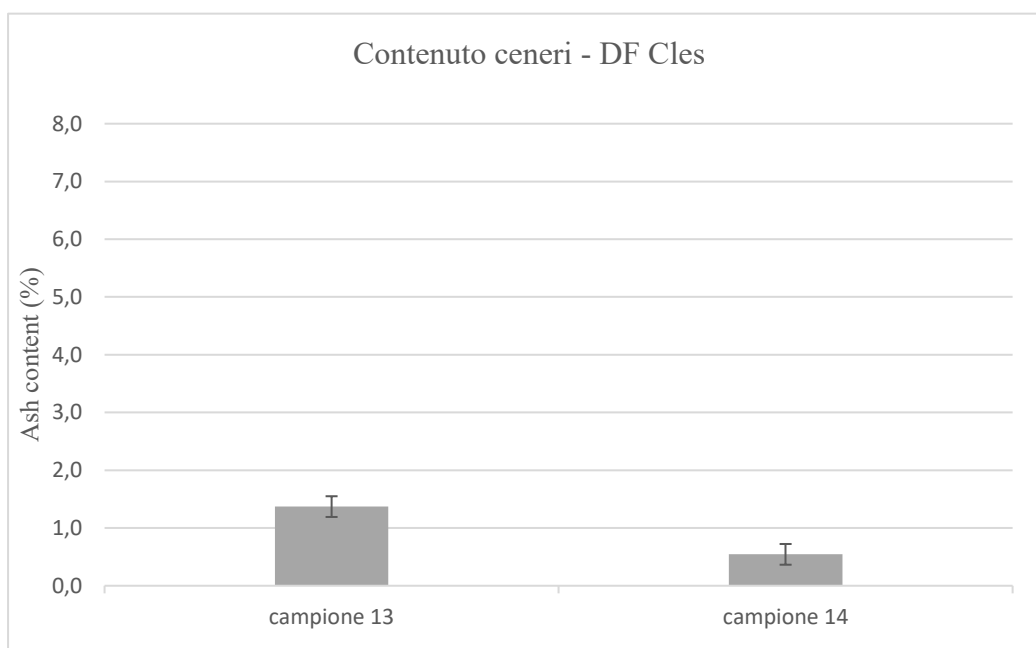
Distretto 6 – Cles

**Tabella 7.9a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Cles

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
13	3	1,37	0,096	7.039	1.3	1.48	0.18
14	3	0,54	0.0568	10.465	0.48	0.59	0.11
<b>Totale</b>	9	0,96	0.458	47.90	0.48	1.48	1.0

**Tabella 7.9b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Cles

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	1,0252	1	1,02507	163,57	0,0002
Intra-gruppo	0,0251	4	0,00626		
Totale (corr.)	1,0501	5			



**Figura 7.11:** Contenuto ceneri del cippato nel Distretto Forestale di Cles e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,179458$ .

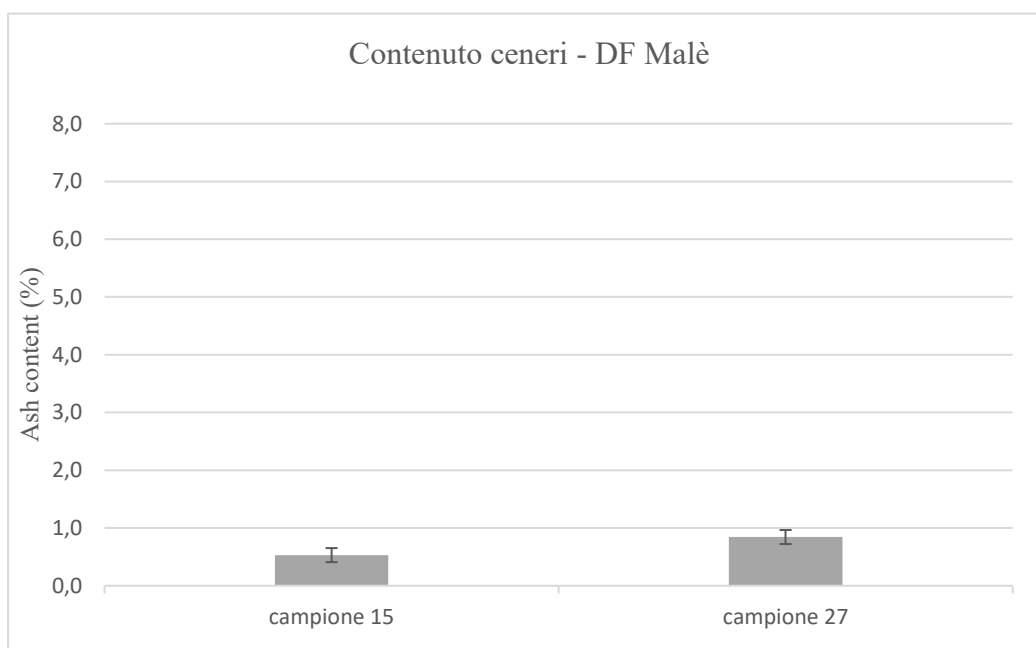
Distretto 7 – Malè

**Tabella 7.10a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Malè

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
15	3	0,53	0,056	10,50	0,48	0,59	0,11
27	3	0,84	0,051	6,084	0,8	0,9	0,1
<b>Totale</b>	9	0,69	0,178	25,94	0,48	0,9	0,42

**Tabella 7.10b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Malè

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	0,1472	1	0,147267	51,37	0,0020
Intra-gruppo	0,0114	4	0,0028		
Totale (corr.)	0,1587	5			



**Figura 7.12:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Malè e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,121376$ .

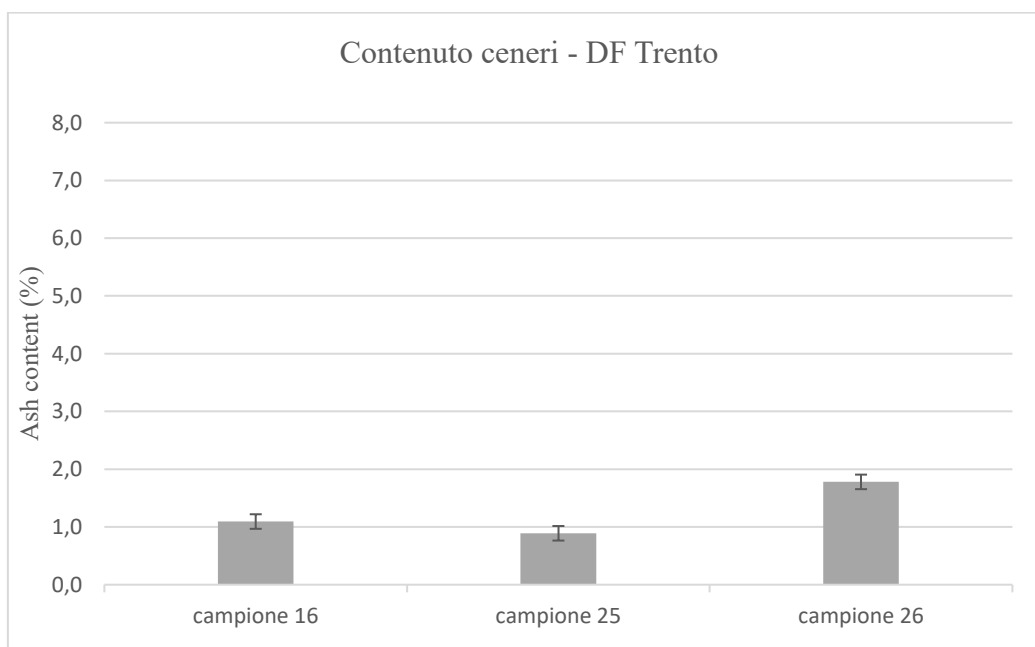
Distretto 8 – Trento

**Tabella 7.11a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Trento

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
16	3	1,09	0,0057	0,528	1,09	1,1	0,01
25	3	0,89	0,0264	2,972	0,86	0,91	0,05
26	3	1,78	0,105	5,945	1,66	1,86	0,2
<b>Totale</b>	9	1,25	0,408	32,490	0,86	1,86	1,0

**Tabella 7.11b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Trento

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	1,305	2	0,652	164,03	0,0000
Intra-gruppo	0,0239	6	0,0040		
Totale (corr.)	1,329	8			



**Figura 7.13:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Trento e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,126007$ .

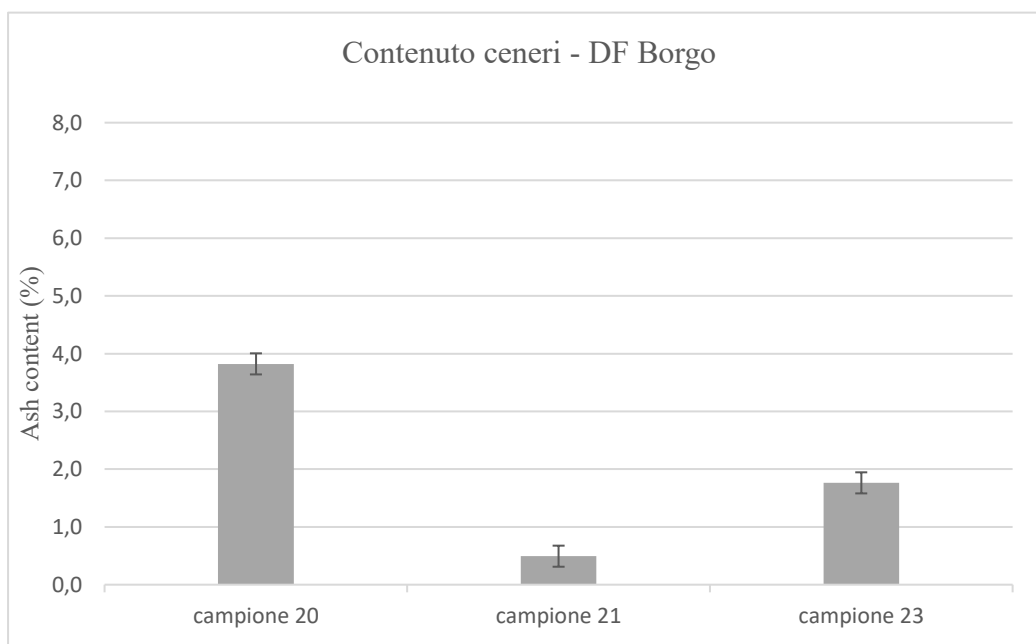
Distretto 9 – Borgo

**Tabella 7.12a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri nel Distretto Forestale di Primiero

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
20	3	3,82	0,127	3,332	3,74	3,97	0,23
21	3	0,49	0,011	2,340	0,48	0,5	0,02
23	3	1,76	0,0929	5,269	1,7	1,87	0,17
<b>Totale</b>	9	2,027	1,457	71,91	0,48	3,97	3,49

**Tabella 7.12b:** Tabella ANOVA per contenuto in cenere nel Distretto Forestale di Borgo

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	16,9454	2	8,472	1016,72	0,0000
Intra-gruppo	0,05	6	0,008		
Totale (corr.)	16,99	8			



**Figura 7.14:** Contenuto ceneri del cippato nel distretto di Borgo e intervallo LSD

Il valore dell'intervallo LSD di Fisher è pari a  $\pm 0,182383$ .

Come accennato l'andamento è univoco per ogni distretto investigato con l'eccezione dei distretti di Malè, Cles e Trento che presentano una eterogeneità leggermente inferiore. Infatti, si registrano valori di F inferiori rispetto quelli assunti negli altri distretti.

#### Sintesi tra Distretti

Al fine di perseguire un'analisi più approfondita per questo parametro qualitativo è riportata anche un'analisi statistica sintetica che confronta i valori dei differenti Distretti unificando le analisi ottenute dai diversi campioni all'interno di ogni distretto stesso.

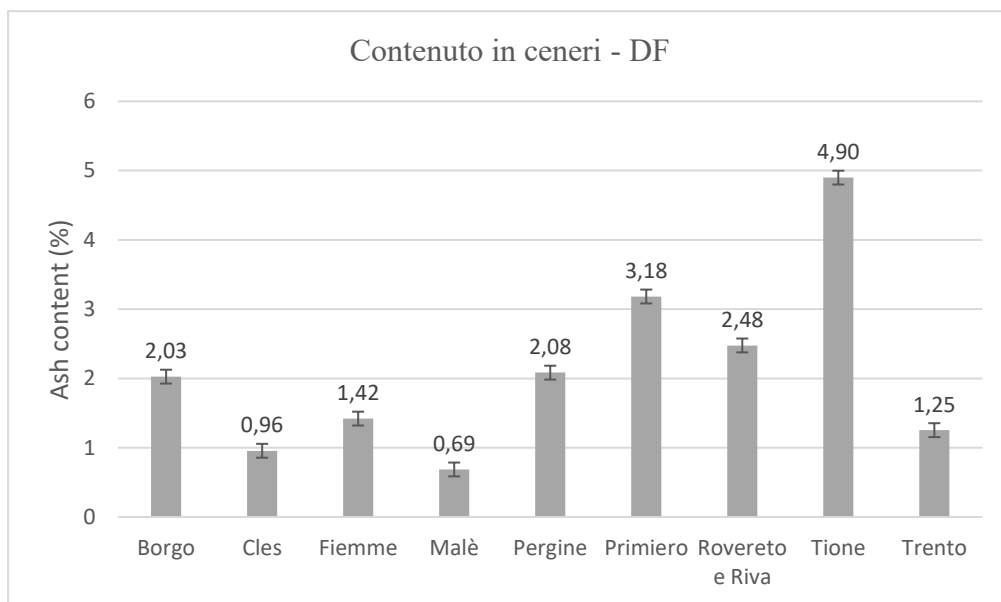
**Tabella 7.13a:** Statistiche di sintesi per il contenuto in ceneri tra i differenti Distretti Forestali

ID campione	Conteggio	Media (%)	Dev. Standard (%)	Coef. di variazione (%)	Minimo (%)	Massimo (%)	Range (%)
Borgo	9	2,03	1,457	71,91	0,48	3,97	3,49
Cles	6	0,97	0,458	47,90	0,48	1,48	1,0
Fiemme	12	1,42	1,397	98,43	0,47	3,89	3,42
Malè	6	0,68	0,178	25,948	0,48	0,9	0,42
Pergine	9	2,08	0,660	31,70	1,52	3,05	1,53
Primiero	9	3,18	2,29	72,11	1,04	6,23	5,19
Rovereto	9	2,47	1,46	59,12	0,55	3,92	3,37
Tione	12	4,89	2,704	55,19	2,15	9,29	7,14
Trento	9	1,25	0,407	32,489	0,86	1,86	1,0
<b>Totale</b>	81	2,29	1,99	87,49	0,47	9,29	8,82

**Tabella 7.13b:** Tabella ANOVA per contenuto ceneri tra i differenti Distretti Forestali

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	134,99	8	16,87	6,59	0,0000
Intra-gruppo	184,25	72	2,55		
Totale (corr.)	319,25	80			

Come si può riscontrare dalla tabella soprastante, il valore di F assume un valore molto basso considerando la totalità dei distretti. Ciò significa che per quanto all'interno di ogni distretto l'eterogeneità risulti essere molto marcata, estendendo l'analisi a livello provinciale ne risulta che i valori vadano complessivamente ad uniformarsi e non discostandosi in maniera così evidente come accadeva invece all'interno di ogni singolo distretto.



**Figura 7.15:** Contenuto ceneri del cippato nei diversi Distretti Forestali

## 7.2.4 Fusibilità delle ceneri

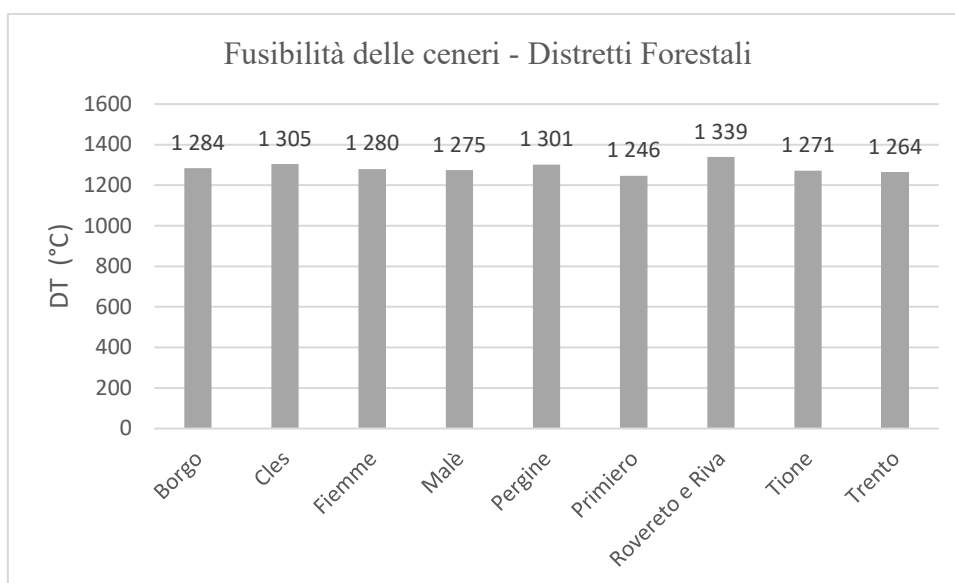
**Tabella 7.14a:** Statistiche di sintesi per la fusibilità delle ceneri (DT) nei differenti Distretti Forestali

ID campione	Conteggio	Media (°C)	Dev. Standard (°C)	Coef. di variazione (%)	Minimo (°C)	Massimo (°C)	Range (°C)
Borgo	9	1284	21,079	1,64	1261	1302	41
Cles	6	1304	48,790	3,74	1270	1339	69
Fiemme	12	1280	78,355	6,12	1201	1387	186
Malè	6	1275	7,0710	0,55	1270	1280	10
Pergine	9	1301	23,115	1,77	1287	1328	41
Primiero	9	1246	58,386	4,68	1206	1313	107
Rovereto	9	1339	29,484	2,20	1306	1362	56
Tione	12	1271	69,713	5,48	1202	1364	162
Trento	9	1264	51,081	4,04	1215	1317	102
<b>Totale</b>	81	1284	51,319	3,96	1201	1387	186

Di seguito è riportata la tabella ANOVA che scompone la varianza della fusibilità delle ceneri in due componenti, una componente intra-gruppo e una componente tra i gruppi. Il rapporto F in questo caso pari a 0,76. F è un rapporto tra la stima tra i gruppi e la stima intra-gruppo. In questo caso, a differenza dei parametri quali il contenuto in ceneri e il contenuto idrico, il valore di *P-value* del test F è maggiore o uguale a 0,05. Quest'ultimo dato indica il fatto che non c'è una differenza statisticamente significativa tra le medie della fusibilità delle ceneri nei diversi distretti. Questo risultato indica un ottimo livello di fusibilità delle ceneri; infatti, considerando che la norma stabilisce un valore soglia di 1200°C si giudica il valore medio assunto dai differenti campioni conforme alla norma stessa.

**Tabella 7.15b:** Tabella ANOVA per punto di fusione delle ceneri (DT)

Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	17313	8	2164,24	0,76	0,64
Intra-gruppo	51161	18	2842,33		
Totale (corr.)	68475	26			



**Figura 7.16:** Punto di fusione delle ceneri (DT) nei diversi Distretti Forestali

In questo caso, come per il parametro relativo al potere calorifico non si rende necessario eseguire il test dei range multipli di Fisher in quanto il valore del coefficiente F e del relativo *P-value* ottenuti non indicano il fatto che vi siano valori che si discostano dalla media in maniera significativa.



### 7.3 ANALISI STATISTICA SUI CONTENUTI DI CS-137

Quanto fatto per le analisi qualitative del cippato eseguite in laboratorio viene ripetuto per il contenuto in Cs-137 dei 27 campioni di cenere di cippato e di segatura in modo da effettuare un confronto a livello provinciale per verificare l'esistenza di settori provinciali in cui potrebbe insistere maggiormente la radioattività unitamente a un confronto generale attraverso la consultazione della letteratura esistente.

**Tabella 16a:** Statistiche di sintesi per il contenuto di Cs-137 nei differenti Distretti Forestali

ID campione	Conteggio	Media (Bq/kg)	Dev. Standard (Bq/kg)	Coef. di variazione (%)	Minimo (Bq/kg)	Massimo (Bq/kg)	Range (Bq/kg)
Borgo	3	152	134,461	88,40	14	282	268
Cles	2	134	47,093	34,96	101	168	66
Fiemme	4	192	86,897	45,13	111	315	204
Malè	2	102	46,527	45,43	69	135	65
Pergine	3	141	14,400	10,20	126	155	28
Primiero	3	203	143,849	70,45	41	316	274
Rovereto	3	79	84,558	105,87	16	175	160
Tione	4	71	62,325	87,57	30	162	132
Trento	3	241	54,887	22,72	190	299	109
<b>Totale</b>	81	147	92,579	62,72	14	316	302

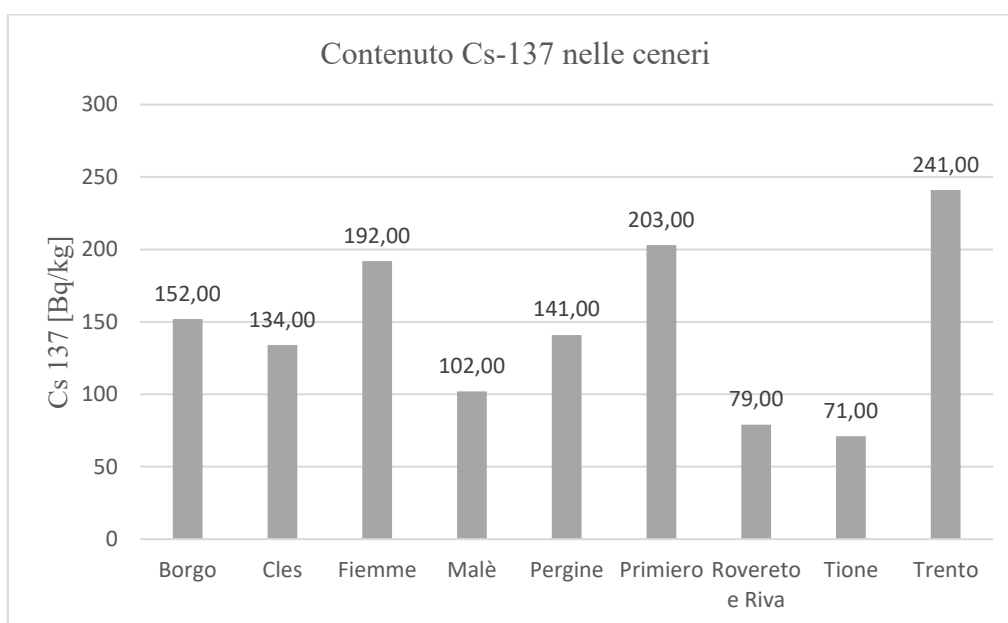
Ad una prima analisi visiva sembrerebbe non esistere una correlazione all'interno del Distretto in quanto il range ottenuto tra i diversi campioni risulta essere abbastanza importante in termini assoluti.

Di seguito è riportata invece la tabella ANOVA che scompone la varianza del contenuto di Cs-137 nelle ceneri in due componenti, una componente intra-gruppo e una componente tra i gruppi. Il rapporto F in questo caso pari a 1,41 con un valore di *P-value* di 0,2579 e dunque maggiore o uguale a 0,05. Quest'ultimo dato indica il fatto che non c'è una differenza statisticamente significativa tra le medie del contenuto in Cs-137 nei diversi Distretti Forestali. Questo risultato indica che vi è una certa omogeneità nella

radioattività del cippato nei diversi Distretti Forestali nonostante la rappresentazione grafica sembri esprimere il contrario.

**Tabella 7.16b:** Tabella ANOVA per contenuto di Cs137 nei diversi distretti.

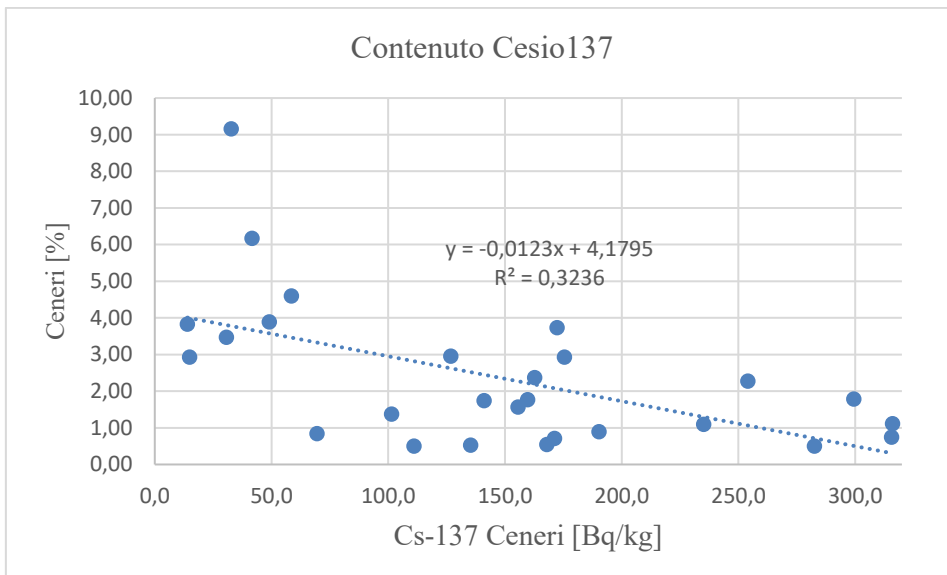
Sorgente	Somma dei quadrati	G.I.	Media dei quadrati	Rapporto F	<i>P-value</i>
Tra i gruppi	17313	8	2164,24	0,76	0,64
Intra-gruppo	51161	18	2842,33		
Totale (corr.)	68475	26			



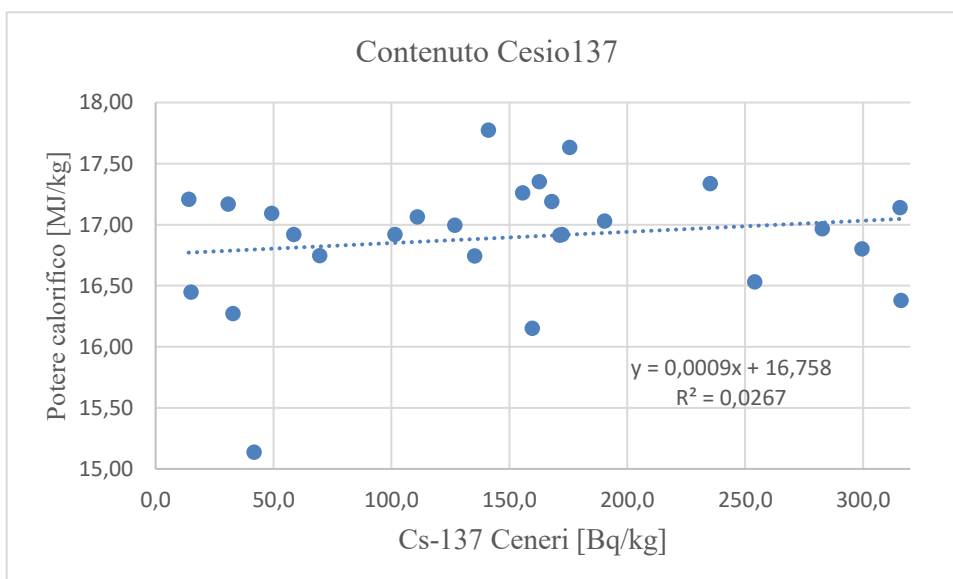
**Figura 7.16:** Contenuto di Cs-137 nelle ceneri nei diversi Distretti Forestali

Come si nota dal grafico i valori appaiono piuttosto diversi considerando la media all'interno del singolo Distretto. Ciò nonostante, i risultati dell'analisi statistica indicano il fatto che non esiste una forte discordanza tra i risultati dei singoli campioni, i quali si aggirano mediamente attorno al valore di 147 Bq/kg.

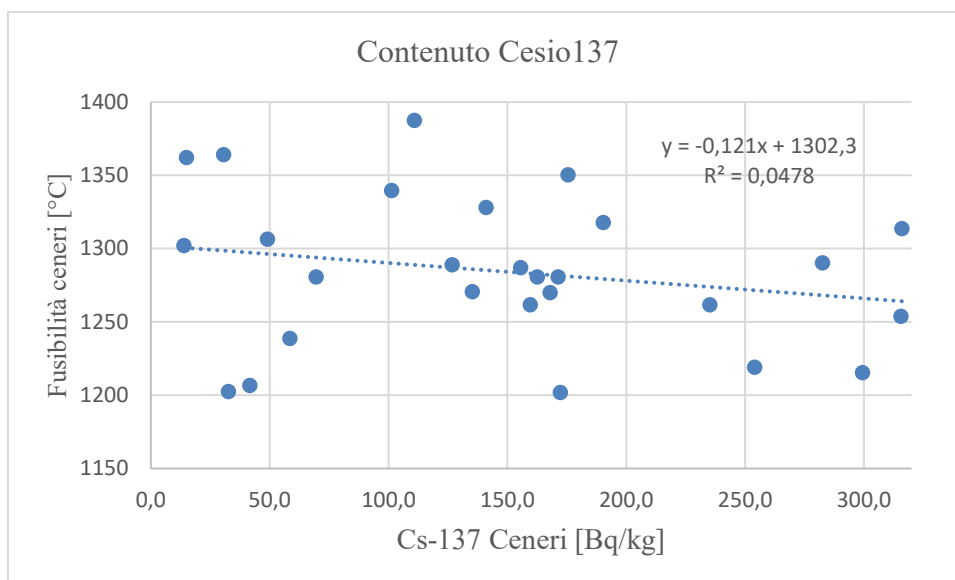
Per quanto riguarda la correlazione con gli altri parametri analizzati in laboratorio sembrerebbe non esistere una relazione che lega in maniera univoca la radioattività ai diversi parametri analizzati.



**Figura 7.17:** Correlazione lineare tra il contenuto in ceneri del cippato e il contenuto di Cs-137.



**Figura 7.18:** Correlazione lineare tra il potere calorifico del cippato e il contenuto di Cs-137.



**Figura 7.19:** Correlazione lineare tra la fusibilità delle ceneri del cippato e il contenuto di Cs-137.

Come si nota infatti i valori di  $R^2$ , che dovrebbero identificare il livello di correlazione tra due variabili sono prossimi allo 0 per tutte le tre situazioni considerate.

Interessante, seppur lieve, è l'accenno di correlazione esistente tra il contenuto in ceneri e il contenuto di Cesio che meriterebbe forse un'analisi più approfondita mettendo in relazione valori provenienti da campioni omogenei per provenienza, età della pianta, parte della pianta utilizzata e altre caratteristiche.

Meriterebbe un approfondimento maggiore anche la relazione che esiste tra il contenuto di Cs-137 nelle ceneri e quello invece concentrato nel cippato tal quale.

Purtroppo, le possibilità economiche limitate, hanno permesso di investigare il contenuto di Cs-137 nella segatura di cippato di solamente 3 campioni.

Per cui, non disponendo di un quantitativo di dati significativo non è possibile analizzare il trend da un punto di vista statistico ma solamente supporre la probabile concentrazione del Cesio nel passaggio da combustibile e ceneri.

**Tabella 7.17:** Dati di laboratorio in riferimento al contenuto in Cs-137

ID campione	Cs-137 ceneri	Cs-137 cippato
16	235,2	3,97
18	316,0	7,89
21	282,6	5,66

## 7.4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dei 27 campioni di cippato di *Picea abies* analizzati e provenienti da differenti distretti della provincia di Trento si sono ottenuti 27 valori relativi al contenuto in Cs 137 nelle ceneri e solamente 3 valori per quanto riguarda i valori del cippato.

Questi valori, finora solamente riproposti in forma grafica, verranno distribuiti all'interno della provincia di Trento attraverso un'interpolazione dei dati e confrontati con valori ottenuti dalla bibliografia esistente.

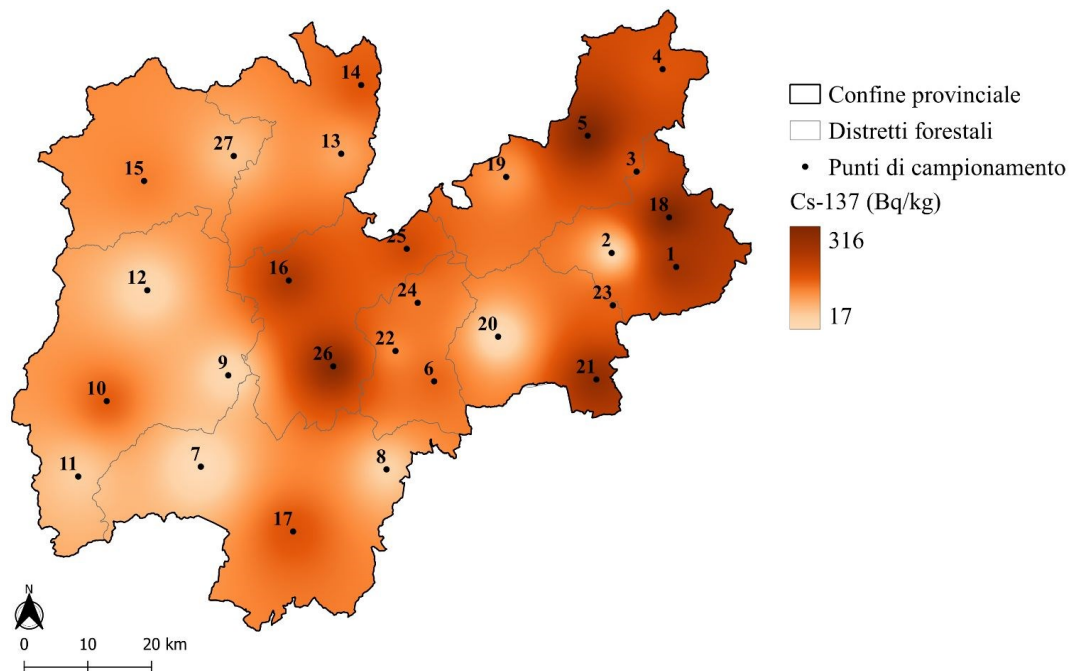
### 7.4.1 Distribuzione territoriale

Attraverso il software *QGis* è stato possibile distribuire i dati puntuali dei campioni all'interno del territorio della provincia di Trento mediante un'interpolazione.

L'interpolazione è una tecnica molto nota e ampiamente utilizzata in ambito GIS, essa infatti permette di creare delle superficie continue a partire da dati discreti di tipo puntuale. Molti fenomeni come le temperature, la piovosità media o in questo specifico caso, il contenuto di Cesio all'interno del legno, sono continui.

Per definire tali superfici e interpretarne i risultati non è possibile prendere le singole misure ed estenderle lungo l'intera superficie su cui insiste, ad esempio, un campione. Per questo motivo i differenti valori ottenuti vengono inferiti attraverso un processo definito "interpolazione" appunto. In *QGis* è possibile farlo attraverso un plugin residente chiamato *Interpolation IDW*.

Sulla base delle 27 posizioni puntuali, ottenute tramite coordinate GPS è stato possibile estrapolare la cartografia riporta in figura 7.22. Tale figura rappresenta la miglior approssimazione di quella che potrebbe essere la distribuzione ipotetica del radionuclide Cs-137 all'interno della provincia di Trento.



**Figura 7.22:** Distribuzione del Cs-137 in provincia di Trento

Dalla figura soprastante risulta chiara e definita la distribuzione del Cs-137 all'interno della provincia di Trento.

Soffermandosi ad una prima impressione si nota una maggior concentrazione di Cesio all'interno dei campioni del Trentino orientale rispetto i campioni del Trentino occidentale.

**Tabella 7.18:** Distribuzione dei campioni nei diversi Distretti Forestali

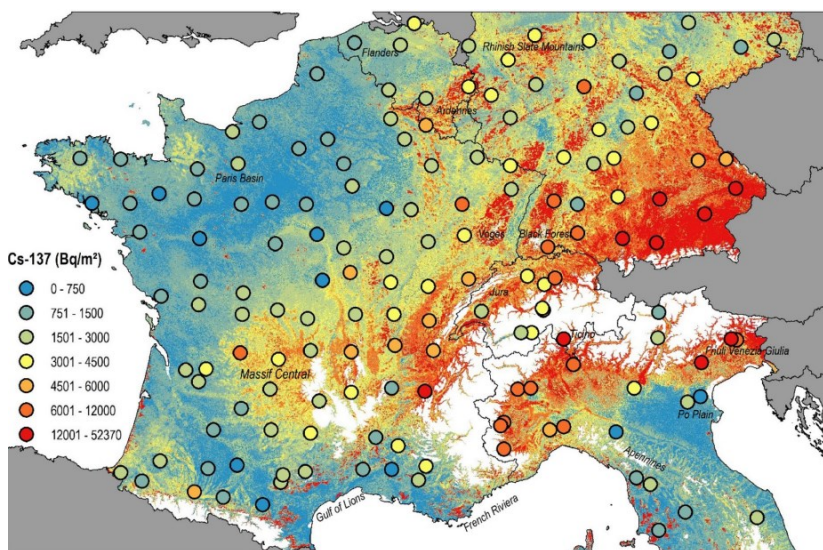
DISTRETTO	CAMPIONI
Primiero	1, 2, 18
Fiemme e Fassa	3, 4, 5, 19
Borgo Valsugana	20, 21, 23
Pergine	6, 22, 24
Trento	16, 25, 26
Riva del Garda e Rovereto	7, 8, 17,
Tione	9, 10, 11, 12
Cles	13, 14
Malè	15, 27

Si nota infatti, facendo riferimento alla precedente tabella che riporta la distribuzione distrettuale dei campioni, come in particolare nei Distretti Forestali di Primiero e Fiemme risulti una maggiormente presenza di Cs-137.

Per qualche motivo anche l'area del centro trentino risulta essere, seppur in maniera più lieve, interessata da un più alto contenuto di radionuclidi. Per semplice conoscenza, senza voler azzardare alcun tipo di ipotesi l'area corrisponde alle zone più urbanizzate del trentino.

Questo andamento sembrerebbe essere in linea con la cartografia esistente riferita all'intera Europa riportata nel capitolo 4 e di seguito riproposta.

Infatti, è possibile notare una maggior concentrazione a livello del trentino orientale andando a scemare gradualmente procedendo verso il nord-ovest europeo in linea con il percorso fatto dalla nube radioattiva del 1986.



**Figure 7.23:** Contenuto di Cs-137 nei primi 20 cm di terreno (Meusburger et al.2020)

Dunque, il contenuto di Cs-137 nel cippato indica che esiste un diffuso contenuto di radioattività all'interno delle aree boschive che tuttavia, come vedremo nel prossimo sotto capitolo, risulta essere abbastanza modesto ed in linea con altre aree forestali europee.

#### 7.4.2 Analisi dei risultati e confronto con la letteratura esistente

Al fine di comprendere maggiormente i risultati ottenuti, i valori emersi dalla presente indagine vengono confrontati con i valori ottenuti da lavori simili.

Dei 27 campioni analizzati nel periodo ricompreso tra maggio e luglio 2022, sembrerebbe che per nessuno di questi il contenuto di Cs-137 nelle ceneri possa rappresentare un pericolo. Infatti, nonostante non esista un limite di legge ben definito, è possibile affermare ciò in base ad osservazioni scientifiche di buon senso.

Un lavoro importante, già citato precedentemente (Cantaluppi et al., 2012) fa riferimento alle caratteristiche radiometriche del pellet d'importazione per il triennio 2010-2012.

Esso riporta inoltre in maniera molto chiara il fatto che non esiste un limite definito da specifica normativa per quanto riguarda la radioattività delle biomasse né quali specifici radionuclidi determinare né tantomeno quali siano i criteri che debbano essere adottati per stabilirne il valore.

campione n.	residuo in ceneri in % rispetto alla massa tal quale	PELLET INC. A	PELLET TAL	RAPPORTO
		400 °C <sup>137</sup> Cs (Bq kg <sup>-1</sup> )	QUALE <sup>137</sup> Cs (Bq kg <sup>-1</sup> )	concentrazione <sup>137</sup> Cs cenere/tal quale
52	1,47	501,3	6,7	75,1
53	4,92	16,4	0,9	18,2
55	1,18	7660,8	85,3	89,8
59	0,88	12155,8	107,1	113,5
62	1,07	553,2	6,2	89,1
63	1,03	8750,4	89,4	97,9
64	1,11	466,7	5,1	91,3
65	0,90	13242,9	129,3	102,4

**Figura 7.24:** Concentrazione di Cs137 in campioni di pellet e nelle corrispondenti ceneri (Cantaluppi et al., 2012)

I risultati del presente lavoro alludono al fatto che il valore limite per il contenuto di Cs-137 di pellet tal quale potrebbero essere posti a circa 10 Bq/kg in modo tale, assecondando la differenza di concentrazione tra prodotto tal quale e ceneri, vi rimanga in quest'ultime un contenuto inferiore a 1 Bq/kg.



I risultati del precedente lavoro sono in linea con il lavoro di Zambelli et al. 2018 che conferma il fatto che diverse indagini effettuate dal laboratorio di fisica e radiochimica di Protex Italia Srl hanno riscontrato gli stessi valori trovati da altri organi di controllo come ARPA; mettendo in luce concentrazioni non allarmanti nella biomassa stessa ma viceversa all'interno delle ceneri concentrazioni di gran lunga superiori.

Infatti, sono state trovate poche decine di Bq/kg all'interno del prodotto tal quale e concentrazioni comprese tra qualche centinaio e qualche migliaio di Bq/kg di Cs-137 nelle ceneri.

Oltre al Cesio, concentrazioni rilevanti e simili nelle ceneri sono state rilevate anche per il Potassio-40. Quest'ultimo parametro non è stato tuttavia investigato dall'elaborato di tesi ma riportato comunque per conoscenza.

Il prodotto utilizzato nelle analisi di Zambelli sono ceneri prelevate direttamente da una centrale a biomassa nell'area di Tarvisio (UD), dunque prodotte a livello industriale e non in laboratorio, riflettendo così la produzione reale di cenere. Dunque, come all'interno del presente elaborato, la produzione delle ceneri è avvenuta, seppur a scala differente, con tecnologie simili a quelle descritte nel capitolo 6 "Materiali e metodi" e non attraverso la combustione in muffola come invece avvenuto nel lavoro di Cantaluppi et al. 2012.

Infatti, i risultati della tesi e sintetizzati nella tabella 7.19, risultano essere in linea con quelli del lavoro appena descritto.

Il contenuto di Cs-137 nelle ceneri, come per Zambelli, assume valori allarmanti e ricompresi nell'ordine di qualche centinaio di Bq/kg, attestandosi attorno ad un valore medio di circa 170 Bq/kg e dunque valori che sembrerebbero essere non preoccupanti se presi singolarmente ma che invece, considerando un quantitativo importante di ceneri come quelle prodotte da un grosso impianto a biomassa non possono essere trascurate.

La valutazione radio-protezionistica per i lavoratori considera gli operatori coinvolti nella raccolta, nel trattamento e nello smaltimento delle ceneri. Quest'ultimo aspetto, come riportato nel capitolo 4 "Stato dell'arte", risulta essere di particolare importanza in quanto, secondo la bibliografia consultata sembra che non si tenga particolarmente in considerazione l'eventuale contenuto di radionuclidi all'interno delle ceneri al fine di determinare delle procedure di smaltimento sicure. Tuttavia, non esistendo un limite specifico al contenuto di radionuclidi risulta difficile anche delineare delle linee guida precise per un corretto smaltimento nei confronti dell'ambiente e della salute umana.

**Tabella 7.19:** Distribuzione dei campioni nei diversi Distretti Forestali

ID campione	Cs-137 ceneri	Distretto
1	254	Primiero
2	41,7	Primiero
3	172,3	Fiemme
4	171,3	Fiemme
5	315,6	Fiemme
6	155,6	Pergine
7	15	Rovereto e Riva
8	49,1	Rovereto e Riva
9	30,7	Tione
10	162,7	Tione
11	58,6	Tione
12	32,7	Tione
13	101,4	Cles
14	168	Cles
15	135,3	Malè
16	235,2	Trento
17	175,5	Rovereto e Riva
18	316	Primiero
19	111	Fiemme
20	14	Borgo
21	282,6	Borgo
22	126,8	Pergine
23	159,7	Borgo
24	141,1	Pergine
25	190,3	Trento
26	299,5	Trento
27	69,5	Malè

Per quanto possibile, al netto dei tre valori ottenuti sul cippato tal quale, i risultati ottenuti sembrano in linea con quelli elaborati da Zambelli et al 2018.

È bene ricordare, riprendendo il discorso relativo alla radioprotezione, che il Cs-137 è considerato un inquinante ubiquitario, come anche indicato dal documento ISPRA TASK 01.02.03 del 2014 ed intitolato “Livelli di riferimento, esenzione e allontanamento (anche NORM), del quale ne viene riportato un estratto:

*“ [...] Il Cs-137 è ormai presente nell’ambiente come inquinante ubiquitario a seguito dell’incidente di Chernobyl, di altri incidenti e di test nucleari in atmosfera: qualora si possa escludere che il Cs-137, nel materiale in esame, derivi da una*

*pratica, per le considerazioni sopra riportate potrebbe apparire ragionevole trattarlo come NORM, assumendo un livello di allontanamento corrispondente a una dose alla popolazione di 300  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ . Tuttavia nessun riferimento normativo supporta questa possibilità, quindi si ritiene opportuno assumere un livello d'allontanamento di 1 Bq/g o, per concentrazioni superiori benché il Cs-137 abbia un  $T_{1/2} > 75\text{gg}$ , effettuare la valutazione di dose ed adottare livelli d'allontanamento corrispondenti a una dose alla popolazione di 10  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ".*

Interpretando la norma, emerge allora che qualora la concentrazione sia inferiore ad 1 Bq/g il residuo possa venire allontanato come un rifiuto non pericoloso, non considerando alcuna ulteriore prescrizione. Se invece, il contenuto è superiore ad 1 Bq/g lo scarto, in questo caso le ceneri, dovrebbero essere eliminate con modalità per le quali nessun individuo possa riceverne una dose annua superiore a 10  $\mu\text{Sv}$ , comportando così un'analisi preliminare del rifiuto prima del trasporto e conferimento o addirittura riutilizzo del sottoprodotto scarto.

Nell'utilizzo delle biomasse occorre dunque sempre valutare l'eventuale presenza di radionuclidi artificiali o naturali in funzione dell'origine della matrice di partenza.

L'incenerimento, come abbiamo potuto constatare dalla letteratura esistente e dalle tre prove riferite al cippato tal quale, può comportare una concentrazione all'interno delle ceneri di Cs-137, motivo per il quale considerando non tanto l'utilizzo domestico ma piuttosto quello industriale è fondamentale adottare misure cautelative di monitoraggio al fine di trattare con le dovute prescrizioni le ceneri che vengono prodotte in abbondanti quantità dagli impianti a biomassa e non tengono sufficientemente in considerazione l'effetto cumulativo del sottoprodotto di scarto.

## 8 CONCLUSIONI

La tesi si proponeva di investigare il livello radioattivo, con particolare riferimento al Cs-137, all'interno di alcuni campioni di cippato prelevati in diverse zone della provincia di Trento.

Dopo una breve introduzione si è parlato in maniera approfondita e specifica della necessità di produrre energia da fonti rinnovabili abbandonando gradualmente l'impiego dei combustibili fossili, più costosi e soprattutto più impattanti sull'ambiente.

In maniera più specifica sono state trattate le biomasse legnose e la necessità di dar loro un ruolo prioritario nella filiera energetica nazionale; sono state presentate le accuse che vengono mosse nei confronti di un'implementazione di tale risorsa e infine si è parlato poi più specificatamente del problema, piuttosto recente, dell'eventuale contenuto di sostanze radioattive all'interno di tali biomasse legnose. Sostanze radioattive la cui derivazione è senz'altro associata principalmente al disastro nucleare di Chernobyl del 1986 di cui ne è stato riportato un estratto.

Per perseguire l'obiettivo è stato svolto un campionamento mirato a ricoprire tutta la provincia di Trento. Il campionamento ha previsto il prelievo di 27 campioni di cippato distribuiti nei 9 distretti forestali della provincia compatibilmente con la disponibilità di cantieri durante il periodo interessato dalle analisi.

I campionamenti sono stati eseguiti in maniera da inanellare differenti macroaree in una singola ripresa ma ciò alle volte non è stato possibile in quanto la mancata presenza di cantieri di cippatura ha ostacolato parzialmente lo schema di campionamento inizialmente previsto dovendo tornare in determinate zone una seconda volta a distanza di alcune settimane. Di fatto questa è stata l'unica e lieve problematica durante tutto il periodo comprendente la fase di campionamento e la fase riguardante le analisi di laboratorio.

Una volta ottenuti i campioni si è reso necessario, attraverso una serie di procedure, produrre del pellet partendo dal cippato campionato perché si potessero ottenere delle ceneri attraverso la combustione a mezzo di una stufa a pellet. L'obiettivo era infatti ottenere delle ceneri appartenenti a biomasse legnose provenienti dalle foreste trentine in maniera tale da stimarne il contenuto di radionuclidi. L'incenerimento è avvenuto a mezzo di una stufa a pellet anziché di una muffola di laboratorio, al fine di simulare la combustione che avviene all'interno di grandi impianti industriali.

È stato scelto il cippato in quanto, prelevandolo direttamente dal cantiere di cippatura, è possibile garantirne la puntuale provenienza e ricostruirne così, attraverso delle interpolazioni, delle stime sull'area ipotetica di incidenza di ogni campione, ovvero zone che statisticamente potrebbero assumere gli stessi valori.

Per altre biomasse legnose, essendo prodotte industrialmente presso le sedi aziendali, non è possibile stabilirne la provenienza precisa come invece per il cippato.

Le ceneri sono state conferite unitamente ad 1 litro di segatura di cippato presso il Laboratorio CNR ICMATE che si è occupato delle analisi di radioattività. Nel frattempo, presso il Laboratorio ABC con sede ad Agripolis sono state eseguite le analisi qualitative del cippato.

Dei 27 campioni analizzati, nel periodo maggio-luglio 2022, nessun campione riporta valori estremamente allarmanti per quanto riguarda il contenuto di Cs-137 nelle ceneri ma piuttosto in linea con quello riscontrato in altre aree forestali europee e riportato in lavori di simile attitudine. Il valore medio riscontrato è nell'ordine di 170 Bq/kg, valore che, secondo altri studi scientifici, non deve comportare particolari preoccupazioni ma piuttosto indirizzare ad alzare il livello di attenzione legato alla gestione del sottoprodotto, soprattutto qualora il quantitativo di ceneri trattato sia elevato.

Infatti, come è stato possibile constatare, non esiste ad oggi un limite univoco e ben definito attraverso il quale catalogare il prodotto o il sottoprodotto come "radioattivo" e trattarlo come tale.

Dai testi consultati, in merito a lavori simili, si assume il fatto che il Cs-137 viene maggiormente concentrato nelle ceneri. Disponendo solamente di 3 valori relativi al campione di cippato tal quale non è stato possibile confermare quanto appreso dalla letteratura ma solamente supporlo.

Alla luce dei risultati, in linea con i lavori consultati, si potrebbe considerare un valore limite di 10 Bq/kg per il prodotto tal quale, che al netto del coefficiente di concentrazione medio desunto dagli articoli scientifici consultati si tramuterebbe in un valore di Cs-137 modesto all'interno delle ceneri ed inferiore a 100 Bq/kg.

Considerando che un maggior contenuto di ceneri è dovuto alla marcata presenza di corteccia nel biocombustibile e noto il fatto che, il cesio, a causa delle sue caratteristiche chimiche e della fisiologia della pianta, tende ad accumularsi proprio nella corteccia;

elevati contenuti in Cs-137 potrebbero essere senz'altro legati ad un cippato prodotto partendo da fusto intero, quindi con elevati contenuti di corteccia e rami.

Dunque, al solo fine di produrre del cippato con il minor contenuto di Cs-137 possibile la strada da percorrere potrebbe essere quella di utilizzare esclusivamente piante private della corteccia e dei rami, ovvero del cippato che è definito “bianco” e caratterizzato da un'estrema selezione del materiale con il quale è prodotto prediligendo piante scortecciate e scarti di segheria.

Per quanto riguarda l'esposizione nei confronti dell'uomo, i valori di radiocesio appaiono tuttavia piuttosto bassi all'interno delle ceneri, specialmente paragonandoli a prodotti ben più radioattivi. Tali valori se non devono allarmare, non devono però nemmeno dar da intendere che non sussista alcun rischio nel trattamento di tale prodotto di scarto. Infatti, si potrebbero verificare casi in cui il livello di contaminazione risulti elevato soprattutto a fronte di importanti quantitativi di cenere prodotta come abbiamo visto avvenire in impianti di grandi dimensioni come le centrali a biomassa dislocate nel territorio.

Questi risultati giustificano il fatto che si potrebbe implementare la ricerca sulla tematica, al fine di aumentare la conoscenza sull'argomento e inserire nei parametri qualitativi uno specifico limite normativo riferito alla radioattività per l'utilizzo dei biocombustibili.

Così facendo si potrebbe creare una filiera foresta-energia priva di ogni rischio per quanto riguarda la tematica radioattività e con le dovute cautele anche nei confronti di altri inquinanti pericolosi per l'uomo ma anche per l'ambiente; è di fondamentale importanza infatti per poter implementare maggiormente l'utilizzo di questa risorsa energetica in ambito nazionale e internazionale al fine di ridurre in maniera drastica la produzione di energia a mezzo di combustibili fossili e favorire quella che viene definita *green energy*.

Infine, grazie ad una maggior conoscenza sulla tematica, potrebbero essere delineate delle linee guida specifiche per lo smaltimento delle ceneri da biomassa contenenti elementi radioattivi, visto che, consultata la normativa, non esiste un riferimento specifico al trattamento di tali prodotti.

Il rischio di inquinamento radioattivo attuale legato alle biomasse sembrerebbe essere modesto ma considerando che l'analisi è stata circoscritta a un territorio limitato non è possibile estendere le considerazioni effettuate a livello nazionale o europeo ma limitatamente al territorio del nord-est italiano.

Una raccomandazione per eventuali studi futuri è quella di estendere la ricerca ad un campione territoriale più ampio per avere un riscontro effettivo con altre regioni a livello nazionale o addirittura nazioni per estendere la ricerca a livello europeo e creare così una filiera energetica controllata, sicura e con i minor ricadute sull'uomo e sull'ambiente.

## 9 BIBLIOGRAFIA

Associazione Italiana per le Energie Agroforestali (AIEL) (2022) *Mercati&prezzi*

Agenzia per le risorse idriche e l'energia, 2017 - *Rapporto di monitoraggio biomassa legnosa Provincia Autonoma di Trento*

Amiro, B. D., Sheppard, S. C., Johnston, F. L., Evenden, W. G., & Harris, D. R. (1996). *Burning radionuclide question: What happens to iodine, cesium and chlorine in biomass fires?*. Science of the Total Environment, 187(2), 93-103.

Baldessarri, N. *Effetto della variazione del prezzo di carburanti e olii minerali sul costo di produzione del cippato forestale.*

Berti, M., (2021). *Valutazione delle possibilita' di utilizzo a fini energetici delle biomasse derivanti dalla gestione del verde urbano.*

Blasi, S. (2013). *Caratterizzazione energetica di alcune biomasse vegetali reperibili in Italia.*

Borelli, M., (2016). *Anova e Confronti Multipli con R.*

Brambilla, M., Fortunati, P. and Carini, F. (2003) *Modello Concettuale Dinamico per lo Studio del Trasferimento di Radiocesio dal Terreno alle Piante d'Interesse Agrario.* Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo, 52, 343-352.

Cavalli, R., (2021), *Appunti del corso Sistemi Foresta-Energia*, Università degli Studi di Padova, Laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali, Anno Accademico 2021/2022.

Cantaluppi C., & Degetto, S. (2000). *Civilian and military uses of depleted uranium: environmental and health problems.* Annali di chimica, 90(11-12), 665-676.

Cantaluppi, C. and Degetto, S. (2003) *Fast Self-Absorption Correction Procedure for Low Energy 210 Pb Gamma Emission in Environmental Samples.* Annali di Chimica, 93, 649-657.



Calabrese, M., Quarantotto, M., Cantaluppi, C., Fasson A., (2011). *Caratteristiche merceologiche e radiometriche del pellet d'importazione*. Atti del XXV Congresso nazionale di Scienze Merceologiche

Cantaluppi, C., M. Calabrese., Ceccotto, F., Cianchi, A., Fasson, A & Degetto, S. (2012). *Caratteristiche radiometriche del pellet in importazione nel periodo 2010-2012 e stime di dose alla popolazione*, AIRP, Congresso Nazionale di Radioprotezione.

Cantaluppi, C., Zannoni, D., Cianchi, A., Giacetti, W., Lovisetto, B., Pagnin, E., & Favero T. (2021). *Methods for radioactivity measurements in drinking water using gamma spectrometry*. Journal of Environmental Radioactivity, 232, 106566.

Chandrasekaran, S.R., Hopke, P.K., Rector, L., Allen, G. and Lin, L. (2012) *Chemical Composition of Wood Chips and Wood Pellets*. *Energy & Fuels*, 26, 4932-4937.

Desideri, D., Rongoni, A., Roselli C., Saetta, D., Feduzi L. *Analytical methods for the determination of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in ash of fuel pellets used in Italy*. Microchemical Journal 103 (2012) 131-134.

Dezy E., 2021 *misura rapida del potere calorifico superiore e del contenuto in ceneri di campioni di cippato mediante micronir*.

Donati, S., 2002. *Distribuzione del contenuto di elementi chimici radioattivi e stabili in Pinus Pinaster e prospettive di utilizzo in dendroanalisi*. Environmental Sciences Degree Thesis. University of Bologna.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Energia Nucleare (1991) *Determinazione del <sup>137</sup>Cs per Spettrometria Gamma Diretta*. UNI 9890.

Guillitte O., Melin J. & Wallberg L., 1994. *Biological pathways of radionuclides originating from the Chernobyl fallout in a Boreal forest ecosystem*. Sci. Tot. Envir., 157: 207-215

Linee tecniche per la pianificazione forestale aziendale – Servizio Foreste e Fauna – Provincia Autonoma di Trento.

- Livens F.R., Horrill A.D. & Singleton D.L., 1991. *Distribution of radiocesium in the soilplant systems of upland areas of Europe*. Health Phys., 60, 4: 539- 545.
- Manera, S., Dilani, D. *Pellet radioattivo Indagine radiometrica e considerazioni di radioprotezione*” Università degli Studi di Pavia – Revisione 2, 15 luglio 2009.
- Meli, M. A., Cantaluppi, C., Desideri, D., Benedetti, C., Feduzi, L., Ceccotto F., & Fasson A., (2013). *Radioactivity measurements and dosimetric evaluation in meat of wild and bred animals in central Italy*. Food Control, 30(1), 272-279.
- Mion, M., 2014 *Analisi teorica di un impianto cogenerativo a biomassa legnosa*.
- Paletto, A., De Meo, I., Cantiani, P., Chiavetta, U., Fagarazzi, C., Mazza, G., ... & Lagomarsino, A. (2018). *Analisi della filiera foresta-legno in una prospettiva di (bio) economia circolare: il caso studio della Foresta di Monte Morello*. L'Italia Forestale e Montana, 73(3), 107-128.
- Peroni, M. (2022). *radionuclidi e il sistema suolo-pianta: Cs-137*.
- Piano Energetico Ambientale Provinciale (PEAP) 2021 – 2030 – Agenzia provinciale per le Risorse Idriche e L’energia (APRIE) – Provincia Autonoma di Trento
- Pieratti, E., Bernardi, S., Romagnoli, M., Sartori, O., & Paletto, A. (2019). *Offerta e domanda di biomasse legnose ad uso energetico in provincia di Trento: un’indagine conoscitiva*. Forest@-Journal of Silviculture and Forest Ecology, 16(1), 16.
- Rauret, G., Laurado, M., Tent J., Rigol, A., Alegre, L.H. & Utrillas, M.J., 1994. *Deposition on holm oak leaf surfaces of accidentally released radionuclides*. Sci. Tot. Environ., 157: 7-16
- Rocco, M., (2010). *La centrale a biomassa: incentivi del mercato elettrico ed impatto ambientale nel territorio circostante*.
- Römmelt R., Hiersche L., Schaller G. & Wirth E., 1990. *Influence of soil fungi (Basidiomycetes) on the migration of Cs134+137 and Sr90 in coniferous forest soils*.

Desmet G. et al. (eds.): Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments. Elsevier, London and New York, 152-160.

Scalet, S., (2005). *Potenzialità delle biomasse legnose e fabbisogno termico in Primiero* (Doctoral dissertation).

Shahjalal, K., Mir Ferdous C., Rabiul A., Aminul I., Takahiro K., (2021). *Efficient cesium encapsulation from contaminated water by cellulosic biomass based activated wood charcoal*. Cemosphere 262,

Tobler, L., Bajo, S. & Wytttenbach, A., 1988. *Deposition of Cs-134 - 137 from the Chernobyl fallout on Norway spruce and on the forest soil, and its incorporation into spruce twigs*. J.Environment. Radioactivity, 6: 225-245

Wolynski A (1993). *Alcune riflessioni sulla selvicoltura naturalistica nell'esperienza trentina*. Dendronatura 2: 51-56.

Ylitalo, E., Mustonen, M., (2014). *Consumption of renewable energy and wood fuels in the European Union*. In: "Forest Bioenergy for Europe" (Pelkonen P, Mustonen M, Asikainen A, Egnell G, Kant P, Ledue S, Pettenella D eds). European Forest Institute (EFI), Joensuu, Finland, pp. 17-22.

Zambelli, G., Cucchi G., Mostacci D., Taroni M., Carnaccini F., Cesarini F., Iannarone A., Ciarmatori A., (2018). *Sostanze radioattive nelle biomasse: rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti nella combustione di pellets e di biomasse di legno derivanti da aeree sensibili*. 4° Congresso Nazionale ANFeA, Caserta, Aprile 20-21.