



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

Corso di Laurea Triennale in
Valorizzazione e tutela dell'ambiente e del territorio montano

PARTICELLE FORESTALI DI MEDIA E ALTA VALTELLINA:
ANALISI DI DATI ASSESTAMENTALI E QUANTIFICAZIONE DELLO
STOCCAGGIO DI CARBONIO

Relatore: Prof. Marco FIALA

Correlatore: Dr. Luca NONINI

Studente: Lorenzo Salvi

N. matricola: 949607

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

RIASSUNTO.....	3
1. INTRODUZIONE	5
1.1 PREMESSA	5
1.2 OBIETTIVI	9
1.3 ATTIVITÀ	10
2. PATRIMONIO FORESTALE LOMBARDO.....	11
2.1 SUPERFICIE, COMPOSIZIONE, PROVVIGIONE E INCREMENTO.....	11
2.2 CLASSI ATTITUDINALI	14
2.3 PIANIFICAZIONE E GESTIONE FORESTALE SOSTENIBILE	16
2.3.1 <i>Piani di Indirizzo Forestali</i>	18
2.3.2 <i>Piani di Assestamento Forestale</i>	19
2.4 INTERVENTI SELVICOLTURALI: ISTANZE DI TAGLIO E PRELIEVI EFFETTUATI	23
3. MATERIALI E METODI	26
3.1 DATABASE “SCHEDA RILIEVO”	26
3.1.1 <i>Dati assestamentali</i>	27
3.1.2 <i>Volume legnoso prelevato</i>	32
3.2 DATABASE “SCHEDA RISULTATI”	35
3.3 QUANTIFICAZIONE DELLE MASSE DI LEGNO E C: IL MODELLO WOODY BIOMASS AND CARBON ASSESSMENT ...	39
3.3.1 <i>Struttura generale</i>	39
3.3.2 <i>Approccio metodologico</i>	41
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	52
4.1 DATI ASSESTAMENTALI	52
4.1.1 <i>Superficie</i>	52
4.1.2 <i>Classe di accessibilità</i>	53
4.1.3 <i>Classe altitudinale</i>	55
4.1.4 <i>Classe di pendenza</i>	56
4.2 PRELIEVI EFFETTUATI	58
4.3 LEGNO E CARBONIO.....	63
4.3.1 <i>Scenario 1</i>	63
4.3.2 <i>Scenario 2</i>	70
4.3.3 <i>Scenario 1 e Scenario 2: confronto e considerazioni generali</i>	75
5. CONCLUSIONI	79
BIBLIOGRAFIA	82
RINGRAZIAMENTI.....	86

RIASSUNTO

I **Piani di Assestamento Forestale (PAF)** sono strumenti operativi mediante i quali le foreste sono gestite a livello locale, definendo - in particolare - gli interventi selvicolturali per la gestione razionale della “risorsa legno”. Le informazioni contenute nei PAF, spesso trascurate, possono rappresentare il punto di partenza per la quantificazione della **massa (stock)** di **Carbonio (C)** contenuto nei boschi che, ai fini della mitigazione degli impatti climatici, rappresenta uno tra i più importanti servizi ecosistemici forniti dalle foreste.

L'Elaborato Finale si pone come **obiettivi generali (OG)**: (OG1) **analisi dei dati assestamentali** e (OG2) **quantificazione delle rese in biomassa** ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ di sostanza secca, SS) e **C** ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ C) di **particelle forestali demaniali** censite nei PAF di **Media e Alta Valtellina** (Regione Lombardia).

La **prima attività** ha riguardato la raccolta di dati relativi a **493 particelle forestali** censite in **7 PAF** della Comunità Montata Valtellina di Tirano e del Consorzio Forestale Alta Valtellina (superficie forestale complessiva: **10543 ha** circa) e la loro organizzazione in un **Database 1 (input)** informatizzato, denominato “**Scheda Rilievo**”, predisposto in ambiente MS Office Excel365®. Nel Database 1 ciascuna particella viene rappresentata in un record, dotato di **104 differenti campi**, **73** dei quali contenenti informazioni di *input* e **31** contenenti calcoli per la **verifica** delle informazioni riportate nel PAF. Complessivamente, dunque, il Database è costituito da $493 \text{ record} \times 104 \text{ campi} = \mathbf{51272}$ informazioni.

Per ciascuna particella, sono stati estratti i dati sia propriamente contenuti nei PAF (**55 dati assestamentali**), sia relativi agli **interventi selvicolturali** (18 dati, riportati nelle istanze di taglio), dal **2005** (anno di entrata in vigore del PAF più vetusto) al **2021** (dati disponibili più recenti).

I dati assestamentali (in totale, 27115) sono sia di **natura amministrativa** (a esempio: comune proprietario, ente gestore, anno di entrata in vigore del PAF), sia relativi a: (i) **caratteristiche gestionali, compositive e morfologiche** (a esempio: classe altitudinale, tipologia forestale, superficie forestale, pendenza prevalente) e (ii) **caratteristiche dendro-auxometriche** (a esempio: volume cormometrico lordo - cioè il volume del fusto -, età media e densità degli alberi). Relativamente agli interventi selvicolturali, sono stati estratti dati relativi a: (i) **volume cormometrico lordo prelevato** con ciascun evento di taglio (m^3) e (ii) data di esecuzione del prelievo.

La **seconda attività** svolta durante il Tirocinio ha riguardato la predisposizione di un **Database 2 (output)** denominato “**Scheda Risultati**”, contenente le elaborazioni relative sia a **ciascun Comune**, sia all'**intero territorio analizzato**. Nel Database 2 ciascun record rappresenta un Comune¹, con 168 valori di *output* (campi): (i) superficie totale e forestale (ha), (ii) volume cormometrico (m^3 ; $m^3 \cdot ha^{-1}$), (iii) incremento annuo ($m^3 \cdot anno^{-1}$; $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$), (iv) superficie per classe di accessibilità (ha), (v) superficie e numero di particelle per classe altitudinale, (vi) superficie e numero di particelle per classe di pendenza e (vii) volume cormometrico lordo complessivamente prelevato in ciascun anno e nel periodo analizzato. Complessivamente, dunque, tale Database è costituito $10 \text{ record} \times 168 \text{ campi} = \mathbf{1680}$ informazioni.

Infine, la **terza attività** ha riguardato l'inserimento dei dati di input del Database 1 nel **modello di calcolo WOody Biomass and Carbon Assessment (WOCAS v2)** elaborato da UniMi-DiSAA per quantificare - secondo le Linee Guida dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* - le rese di biomassa ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ SS) e C ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ C) per ciascuna particella forestale dall'anno di entrata in vigore del PAF fino a un anno di riferimento. Tali masse sono ripartite nei seguenti comparti ecosistemici (*pools*): (i) **biomassa legnosa epigea** (B_{EPI} ; fusto, rami e cimali con

¹ Nonostante un PAF sia generalmente ascrivibile a un solo Comune, nell'analisi condotta il n. di PAF non corrisponde al n. dei Comuni perché per 4 di essi il PAF è il medesimo. In totale, dunque, il n. dei PAF analizzati è pari a 7, ma i comuni sono 10.

corteccia), (ii) **biomassa legnosa ipogea** (B_{IPO} ; radici con $\varnothing \geq 0,2$ cm) e (iii) **sostanza organica morta** (SOM), comprensiva di legno morto ($\varnothing \geq 10$ cm) e lettiera ($\varnothing < 10$ cm).

Nel presente studio, le rese di biomassa e C sono state quantificate per il **periodo 2005-2021**. Per ciascuna particella sono stati analizzati **due scenari (S1 e S2)** in base al valore assunto dal parametro **“fattore di espansione della biomassa”** (vale a dire il rapporto tra biomassa legnosa epigea e massa cormometrica che - in pratica - quantifica la massa di ramaglia rispetto alla massa totale della pianta): (i) S1: **valore costante** per ciascuna specie legnosa, già tabulato nel modello e desunto dall’Inventario Forestale Nazionale (IFN, 2005) e (ii) S2: **valore variabile**, calcolato per ciascuna particella in base alla massa cormometrica che la caratterizza.

I **risultati ottenuti** mostrano che, nel periodo analizzato, sono stati effettuati **411 prelievi** su **210 particelle** (min = 1; max = 6 prelievi per particella), per un volume cormometrico lordo pari a **44760 m³ (20480 t SS)**. La specie legnosa maggiormente interessata dai prelievi è *Picea abies* L. (54% della massa totale prelevata), seguita da *Pinus Sylvestris* L. (25%) e *Larix Decidua* Mill. (16%).

La massa di **ramaglia potenzialmente producibile** (RP_{TOT} ; t SS) in seguito al prelievo di massa cormometrica è $RP_{TOT} = 5910$ t SS e $RP_{TOT} = 3125$ t SS per S1 e S2, rispettivamente.

Al **2021 e a livello territoriale**, i risultati evidenziano che:

SCENARIO	STOCK	TOTALE	EPIGEA	IPOGEA	SOST.ORG.MOR
		B_{TOT}	B_{EPI}	B_{IPO}	SOM
		t·ha ⁻¹ SS (%)	t·ha ⁻¹ SS (%)	t·ha ⁻¹ SS (%)	t·ha ⁻¹ SS (%)
S1	BIOMASSA	185 (100%)	130 (70%)	29 (16%)	26 (14%)
	CARBONIO	90 (100%)	63 (70%)	14 (16%)	13 (14%)
S2	BIOMASSA	167 (100%)	115 (69%)	29 (17%)	23 (14%)
	CARBONIO	83 (100%)	58 (70%)	14 (17%)	11 (13%)

In generale, passando dal 2005 al 2021, le rese aumentano, a causa di **differenti fattori**: (i) entrata in vigore di nuovi PAF, (ii) crescita forestale in particelle già gestite con PAF, (iii) **tasso di prelievo** (TP = rapporto tra massa cormometrica prelevata e incremento netto) sempre inferiore all’unità ($TP_{min} = 0,013$; $TP_{max} = 0,203$). Quest’ultimo aspetto suggerisce che gli interventi selvicolturali sono stati condotti rispettando il criterio della **gestione forestale sostenibile**, secondo cui la massa prelevata deve risultare inferiore all’incremento netto. Osservando i bassi valori del TP ottenuti nell’area Valtellinese di studio, si desume che si **sarebbe potuto prelevare una massa cormometrica sensibilmente maggiore senza peggiorare le caratteristiche dei soprassuoli**.

Confrontando i risultati ottenuti nei due Scenari emerge che l’impiego nel modello di **valori variabili** del fattore di espansione della biomassa determina una **resa di biomassa** (t·ha⁻¹ SS) e - conseguentemente anche di C - nei differenti **“pools” più bassa**, mediamente tra 7,4% (2020) e 8,8% rispetto a quella correlata all’impiego di valori costanti del parametro.

L’attività svolta è **estremamente importante** e ha una **valenza pratica significativa** perché, oltre a **quantificare** per la prima volta la **resa legnosa e il corrispondente stock di C dei boschi di Media e Alta Valtellina a scala di singola particella**, ha dimostrato che il fattore di espansione della biomassa è un parametro chiave, perché a seconda dei valori impiegati si ottengono **variazioni non trascurabili nelle rese** (legnose e di C) risultanti.

Per tali motivi, i risultati dovrebbero essere posti all’attenzione di **autorità locali e tecnici**, affinché siano impiegati nelle future pratiche **sostenibili** di gestione forestale.

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

In Europa le foreste coprono circa **2,27·10⁸ ha** (35% della superficie totale), cioè circa il 5% della superficie forestale mondiale (Forest Europe, 2020). Circa l'87% delle foreste europee è classificato come seminaturale, il 4% come naturale e il 9% come piantagione. Nel corso di centinaia di anni, le condizioni climatiche, i fattori ambientali e idrologici, nonché le pratiche selvicolturali condotte dall'uomo hanno portato allo sviluppo di foreste caratterizzate da sistemi di gestione, funzioni e specie molto differenti tra loro.

I principi della **Gestione Forestale Sostenibile**² riconoscono la **multifunzionalità** delle foreste e che esse forniscano diversi **servizi ecosistemici**³ indispensabili per il funzionamento della biosfera e il soddisfacimento dei bisogni umani. Tali servizi possono essere suddivisi nelle seguenti categorie (TEEB, 2010):

- servizi di **approvvigionamento**, che includono prodotti quali alimenti (esempio: semi, noci e altra frutta, spezie e foraggi), legno e cellulosa, piante aromatiche e pigmenti;
- servizi di **regolazione**, che includono il sequestro del carbonio (C) la regolazione dell'acqua, la protezione dai rischi naturali (esempio: inondazioni, valanghe, caduta massi ed erosione), la purificazione dell'acqua e dell'aria;
- servizi **culturali**, che comprendono i benefici immateriali ottenuti dall'ecosistema, come la ricreazione, il patrimonio culturale, l'educazione, il valore estetico, spirituale e religioso.

Le foreste forniscono anche servizi che non rientrano nelle categorie precedente elencate, pur essendo essenziali per la produzione di tutti gli altri servizi. Questi rappresentano le **funzioni** stesse dell'ecosistema, come ad esempio la fotosintesi, i nutrienti e il ciclo idrogeologico, la formazione del suolo e l'habitat per specie animali e vegetali.

Il ruolo delle foreste ha ricevuto molta più attenzione rispetto al passato quando la comunità politica e scientifica internazionale ha iniziato ad affrontare congiuntamente il problema del **surriscaldamento globale** e del **cambiamento climatico** (EASAC, 2017).

² Il concetto di "Gestione Forestale Sostenibile" è stato introdotto nel 1993 dalla Conferenza Ministeriale per la Protezione delle Foreste in Europa ed è definito come *"la gestione e l'uso delle foreste e dei terreni forestali in modo e a un ritmo che ne mantenga la biodiversità, la produttività, la capacità di rigenerazione, la vitalità e il loro potenziale per adempiere, ora e in futuro, le funzioni ecologiche, economiche e sociali, a livello locale, nazionale e globale, senza che ciò causi danni ad altri ecosistemi"* (EASAC, 2017).

³ Benefici multipli che l'uomo ottiene sia direttamente, sia indirettamente, dall'ambiente naturale per il soddisfacimento dei propri bisogni (Millennium Ecosystem Assessment, 2009).

Tale problema è affrontato attraverso la **Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici** (*United Nation Framework Convention of Climate Change UNFCCC*, 1992) e i **Programmi di Azione Ambientale** dell'Unione Europea. L'obiettivo dell'UNFCCC è definire una concentrazione di gas a effetto serra (GHG) nell'atmosfera a un livello tale da prevenire pericolose interferenze antropogeniche con il sistema climatico. Tale livello dovrebbe essere raggiunto entro un periodo di tempo sufficientemente lungo da consentire agli ecosistemi di adattarsi naturalmente al cambiamento climatico, per garantire che la produzione alimentare non sia minacciata, e per consentire allo sviluppo economico di procedere in modo sostenibile.

Un passo importante verso il conseguimento dell'obiettivo dell'UNFCCC è stato compiuto nel dicembre 1997 attraverso il **Protocollo di Kyoto**, che ha reso operativo l'UNFCCC impegnando i Paesi industrializzati e le economie in transizione a **ridurre le emissioni di GHG** secondo target individuali. Il Protocollo di Kyoto, inoltre, amplia il campo di applicazione dell'UNFCCC, e ciò è dimostrato dal fatto che le emissioni nette di CO₂ e GHG possono essere ridotte anche rimuovendo tali gas dall'atmosfera. L'**articolo 3.3** del Protocollo stabilisce che le emissioni e gli assorbimenti di CO₂ e altri GHG risultanti dall'insediamento di nuove foreste (piantagioni, rimboschimento) e dalla conversione delle foreste in altre forme di uso del suolo (deforestazione) effettuate dopo il 1990 devono essere inclusi nel **National Inventory Report** (NIR) che ciascun Paese elencato nell'Allegato I della Convenzione deve predisporre.

L'**articolo 3.4** del Protocollo consente invece la contabilizzazione delle emissioni e degli assorbimenti di CO₂ e altri GHG relativi alle cosiddette "**attività aggiuntive**" - che comprendono anche la **gestione forestale** - purché avvenute dopo il 1990.

Inoltre, il ruolo chiave delle foreste nella mitigazione dei cambiamenti climatici è stato riconosciuto anche dal recente **Accordo di Parigi** (novembre 2016) - che ha definito la necessità di mantenere l'aumento della temperatura globale al di sotto dei 2°C rispetto al periodo preindustriale - e dal **regolamento UE 2018/841** per il settore **Uso del suolo, Cambiamenti di Uso del Suolo e Silvicultura (LULUCF)** (Grassi et al., 2018; Nabuurs et al., 2018).

Le foreste assorbono la CO₂ atmosferica e la trasformano in C per la loro crescita attraverso il processo di fotosintesi. Tale C viene dapprima immagazzinato nella **biomassa aerea** (foglie, rami e fusto), quindi viene trasferito ad altri compartimenti, quali: (i) **biomassa ipogea** (apparato radicale), (ii) **sostanza organica morta** (legno morto e lettiera) e (iii) **suolo** (IPCC, 2006). La massa di C immagazzinato (il cosiddetto "**stock**") dipende dalla massa del legno e dalla sua dinamica, e quindi può aumentare o diminuire a seconda di: (i) **condizioni climatiche e ambientali** (principalmente temperatura e precipitazioni), (ii) **struttura del soprassuolo** (densità degli alberi, specie ed età), (iii) **pratiche di gestione selvicolturale** e (iv) **disturbi**

naturali (a esempio incendi, focolai di insetti, schianti da vento e tempeste, valanghe) (EASAC, 2017; Forest Europe, 2020).

In **Italia**, dopo secoli caratterizzati da deforestazione e impiego intenso delle risorse forestali più facilmente accessibili (che hanno causato impoverimento dei suoli e diminuzione della biodiversità animale e vegetale), tra la fine del 1800 e l'inizio del 1900 si è assistito a una inversione di tendenza. Dall'inizio del 1900, infatti, la **copertura forestale** è **triplicata** e, nel 2018, per la prima volta, il territorio coperto da foreste ha superato quello destinato a fini agricoli (Marchetti et al., 2018). L'espansione del bosco è stata causata principalmente da due fattori: (i) progressivo **abbandono gestionale** dei territori rurali, determinato sia dallo sviluppo industriale e urbano, sia dal crescente disinteresse per la tutela e la valorizzazione delle risorse locali e, conseguentemente (ii) graduale diminuzione dei **prelievi legnosi** (Romano, 2015).

In tale contesto, la **pianificazione** e la **gestione** forestale sono fondamentali per limitare il depauperamento delle risorse naturali e garantire la fornitura di **servizi ecosistemici**. Ciò è particolarmente importante per la scala locale, e specialmente per le aree montane, dove le foreste sono una parte essenziale degli ecosistemi e contribuiscono fortemente allo sviluppo economico. Oltre allo stoccaggio di C, infatti, le foreste contribuiscono alla mitigazione del cambiamento climatico fornendo **materia prima** che può essere impiegata per la costruzione di **prodotti a lungo ciclo di vita** e la **generazione di energia** (calore e/o elettricità) (EASAC, 2017).

L'impiego del legno dovrebbe basarsi sul concetto di “**cascata**”, che implica l'utilizzo prioritario del materiale in base ai **maggiori valori aggiunti** che si possono generare lungo la filiera, e l'utilizzo a scopo energetico solo quando altre opzioni non sono più tecnicamente percorribili (Ciccarese et al., 2014). I prodotti legnosi a lungo ciclo di vita includono mobili, porte, pavimenti, imballaggi, e prodotti in carta (Canals Revilla et al., 2014) e rappresentano una valida strategia per estendere lo *stock* di C al di fuori delle foreste, garantendo la cosiddetta “**carbo-ritenzione extra-boschiva**” (Perone et al., 2015).

Il ruolo dei prodotti legnosi nella mitigazione del cambiamento climatico è stato riconosciuto solo di recente dal Protocollo di Kyoto. Il primo periodo di impegno (2008-2012) era valido il concetto (estremamente semplificato) secondo cui la massa di C nel legno è ossidata (e quindi emessa direttamente in atmosfera) quando la biomassa viene raccolta. In realtà, i prodotti legnosi possono agire da deposito o fonte di C a seconda della variazione dello *stock* in essi contenuto. Pertanto, a partire dal secondo periodo di impegno del Protocollo (2013-2020), e nel contesto dell'attuale regolamento UE 2018/841 per LULUCF (Grassi et al., 2018; Nabuurs et al., 2018), l'inclusione delle procedure per la **contabilizzazione del C** anche per i prodotti legnosi a lungo ciclo di vita è **obbligatoria** (Pilli et al., 2015).

Quando la biomassa legnosa è impiegata per la **produzione di calore e/o elettricità**, il C sequestrato viene rilasciato nell'atmosfera quasi immediatamente. Tuttavia, il C rilasciato durante la combustione del legno fa parte del “**ciclo C a breve termine**”; fintanto che la massa di legno prelevata con le utilizzazioni non supera quella che cresce ogni anno, la concentrazione atmosferica di C non aumenta, poiché il C emesso è stato precedentemente assorbito dall'atmosfera dagli alberi abbattuti e verrà nuovamente sequestrato dalla ricrescita degli alberi nel medesimo popolamento o dalla crescita di alberi in altri popolamenti che fungono da pozzo di C (C biogenico). Di conseguenza, la **termo-degradazione** della biomassa legnosa non provoca ulteriori emissioni di C nell'atmosfera e, per tale motivo, l'impiego energetico della biomassa legnosa è stato classificato come “**neutrale**” dal punto di vista delle emissioni di C in atmosfera. Al contrario, la **combustione di combustibili fossili** provoca un flusso lineare di C dai depositi geologici (in cui C è stato rinchiuso per milioni di anni) all'atmosfera (IEA Bioenergy Task 45, 2021).

Vantaggi e svantaggi legati all'impiego del legno a fini energetici sono ancora fortemente dibattuti dalla comunità scientifica e politica. Il concetto di “**carbon neutrality**” ha dato un forte impulso alle politiche dell'UE, con l'obiettivo di aumentare l'uso della biomassa forestale come fonte energetica al fine di limitare l'impiego di combustibili fossili (EASAC, 2017; Norton et al., 2019). Ciò ha portato la Commissione Europea a includere la biomassa forestale tra le **fonti energetiche rinnovabili (FER)** nella “**Direttiva sull'energia rinnovabile**” (*Renewable Energy Directive*) del 2009 come “**parte del pacchetto di misure necessarie per ridurre le emissioni di gas serra**” (Norton et al., 2019).

Diversi autori hanno riconosciuto che il concetto di “**carbon neutrality**” è estremamente semplicistico per diversi motivi. Innanzitutto, il prelievo della biomassa legnosa riduce immediatamente lo *stock* di C forestale nella biomassa e nel suolo (Routa et al., 2011) rispetto al mancato recupero; inoltre, l'aumento iniziale della concentrazione atmosferica di C dovuto alla combustione di biomassa invece che di combustibili fossili provoca un aumento del *forcing radiativo*, contribuendo al surriscaldamento globale; ciò provoca un effetto opposto a quello per cui le stesse FER sono impiegate che si inverte solo quando, e se, la biomassa forestale ricresce e riassorbe il C precedentemente emesso (Norton et al., 2019).

Inoltre, quando si utilizza il legno per produrre energia, sono necessari input di combustibili fossili per la raccolta, la lavorazione, lo stoccaggio e il trasporto della materia prima (Cherubini et al., 2009; Routa et al., 2011; EASAC, 2017; IEA Bioenergy Task 45, 2021). Nonostante tali input siano generalmente una piccola frazione del contenuto energetico dei prodotti bioenergetici finali (Routa et al., 2011), dovrebbero essere tutti considerati per valutare i

benefici climatici complessivi legati all'uso della biomassa forestale in sostituzione dei combustibili fossili.

Pertanto, il concetto di “*carbon neutrality*” è fortemente dipendente dal contesto di riferimento e deve essere considerato caso per caso tenendo conto sia della tipologia di biomassa impiegata, sia tempo necessario per assorbire la massa di C precedentemente emessa e di tutte le emissioni di CO₂ che verificano all'interno della filiera di trasformazione (EASAC, 2017; Norton et al., 2019).

Per fornire supporto decisionale alla gestione del territorio locale e promuovere un utilizzo efficiente della “risorsa legno” a differenti scale spazio-temporali è necessario dotare i Decisori Pubblici di strumenti in grado di gestire efficacemente le informazioni contenute nei **Piani di Assestamento Forestale (PAF)**, che definiscono la modalità di gestione dei soprassuoli forestali per una corretta pianificazione e programmazione degli interventi selvicolturali, in un’ottica di multifunzionalità.

Le **aree assestate**, seppure con alcuni **limiti** legati alla mancata applicazione delle prescrizioni contenute nei Piani o alla presenza di elaborati da tempo scaduti e perciò privi di efficacia dal punto di vista sia normativo, sia informativo, possono soddisfare i requisiti posti dalle Linee Guida dell’IPCC sia relativamente alla **definizione delle pratiche colturali** e delle aree interessate dalle stesse (le particelle forestali) sia alla **tempistica di realizzazione degli interventi** (Pilli e Anfodillo, 2006). D’altro canto, la scala temporale, normalmente superiore al decennio, e la disomogenea distribuzione spaziale dei rilievi dendrometrici nelle particelle, possono rendere inutilizzabili dati preziosi, quali a esempio, la distribuzione diametrica e la composizione del soprassuolo che, opportunamente impiegati, potrebbero fornire una stima dettagliata dello *stock* di C mediante l’applicazione di coefficienti di espansione o di equazioni allometriche (Pilli e Anfodillo, 2006; Somogyi et al., 2007; Guo et al., 2010).

1.2 Obiettivi

L’Elaborato Finale è basato sui seguenti **obiettivi generali (OG)**:

- **OG1:** Predisposizione di **schede informative particellari** relative alle particelle forestali demaniali censite nei PAF della **Comunità Montana Alta Valtellina** e **Comunità Montana di Tirano**;
- **OG2:** quantificazione delle rese di biomassa ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ di sostanza secca, SS) e C ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ C) a scala di **singola particella** e in **differenti comparti ecosistemici** (biomassa

legnosa epigea, biomassa legnosa ipogea, sostanza organica morta) per il periodo **2005-2021**.

Le schede informative particellari informatizzate sono disponibili per la visualizzazione, l’inserimento e la modifica dei dati, e possono essere utili ad **Enti Locali** (Comuni, Comunità Montane, Consorzi Forestali) per migliorare la gestione e la pianificazione delle risorse forestali. I **risultati ottenuti** hanno inoltre **dimostrato** che i dati contenuti nei PAF, se adeguatamente gestiti, sono fondamentali per quantificare le masse di legno e C a scala di singola particella sia nella biomassa epigea, sia nella biomassa ipogea e nella sostanza organica morta, che non sono considerati nei PAF. Tali risultati possono essere impiegati per future **pratiche sostenibili di gestione forestale** orientate al miglioramento della composizione dei soprassuoli e del loro valore ecologico, compatibilmente con la fornitura di **servizi ecosistemici**.

1.3 Attività

Le attività condotte nell’Elaborato sono elencate in **Tabella 1.1**, specificando per ciascuna di esse lo **scopo**.

Tabella 1.1 - Schema delle attività eseguite.

Fase di lavoro		Scopo
N.	Nome	
1	Predisposizione Database 1 (“Scheda Rilievo”)	Predisposizione di un Database 1 (<i>input</i>) denominato “Scheda Rilievo” contenente dati assestamentali e volume legnoso prelevato con gli interventi selvicolturali (periodo 2005-2021) nel territorio della Comunità Montana Valtellina di Tirano e Comunità Montana Alta Valtellina.
2	Predisposizione Database 2 (“Scheda Risultati”)	Predisposizione di un Database 2 (<i>output</i>) denominato “Scheda Risultati” con produzione di risultati aggregati a livello di: (i) singolo Comune e (ii) territorio.
3	Quantificazione rese di biomassa e C	Inserimento dei dati contenuti nel Database 1 nel modello di calcolo <i>WOody biomass and Carbon ASsessment (WOCAS v2)</i> ⁴ e quantificazione (2005-2021) delle rese in biomassa ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ SS) e C ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ C) per singola particella in: (i) biomassa legnosa epigea (fusto, rami e cimoli con corteccia), (ii) biomassa legnosa ipogea (radici con $\varnothing \geq 0,2$ cm) e (iii) sostanza organica morta, comprensiva di legno morto ($\varnothing \geq 10$ cm) e lettiera ($\varnothing < 10$ cm). Analisi dei risultati ottenuti e discussione.

⁴ Tale modello è stato specificatamente predisposto nel contesto di un Dottorato di Ricerca attivo presso il DiSAA nel periodo 2017-2020.

2. PATRIMONIO FORESTALE LOMBARDO

2.1 Superficie, composizione, provvigione e incremento

Dal 1936 ad oggi la superficie forestale è aumentata del 65,7%, meno della media nazionale (+73%), con notevoli differenze tra le provincie montane e quelle di pianura. Secondo ERSAF (ERSAF, 2020), sulla base di quanto riportato nelle carte regionali di **Destinazione d'Uso del Suolo Agricolo e Forestale (DUSAF)**, l'andamento della superficie boscata nel decennio 2009-2018 è stata caratterizzata da un aumento complessivo pari al 2,7% (10866 ha), vale a dire circa 1758 ha-anno⁻¹, dovuto principalmente a: (i) espansione naturale del bosco (+1699 ha-anno⁻¹), (ii) realizzazione di nuovi boschi (+176 ha-anno⁻¹) e (iii) perdita di superfici forestali a causa di cambiamenti d'uso del suolo (117 ha-anno⁻¹). Al 2020, l'**indice di boscosità** (rapporto tra la superficie boscata e la superficie totale di un dato territorio) è pari al **26%**, con una superficie forestale di **619726 ha** circa.

L'81% della superficie forestale è situato in aree montane, il 12% in aree collinari e il restante 7% in aree di pianura. La **Tabella 2.1** riporta la superficie boscata (ha; % su superficie forestale totale) e l'indice di boscosità (% su superficie totale) per ciascuna provincia lombarda, mentre la **Figura 2.1** riporta l'indice di boscosità a livello comunale. Relativamente alla **proprietà**, quella privata ammonta al 60,6% della superficie, mentre quella pubblica è pari al restante 39,4%.

Tabella 2.1 - Superficie boscata e indice di boscosità suddivisi per provincia (Fonte: ERSAF, 2020).

Provincia	Superficie boscata ha (% sup. for. tot)	Indice di boscosità % sup. tot
Bergamo	113883 (18,3)	41,0
Brescia	171469 (27,7)	36,0
Como	60755 (9,8)	47,0
Cremona	3625 (0,6)	2,0
Lecco	37881 (6,2)	47,0
Lodi	2228 (0,4)	3,0
Mantova	2208 (0,3)	1,0
Milano	8632 (1,4)	5,0
Monza e Brianza	4064 (0,6)	10,0
Pavia	37506 (6,0)	13,0
Sondrio	125112 (20,2)	39,0
Varese	52433 (8,5)	44,0
Totale	619726 (100,0)	26,0

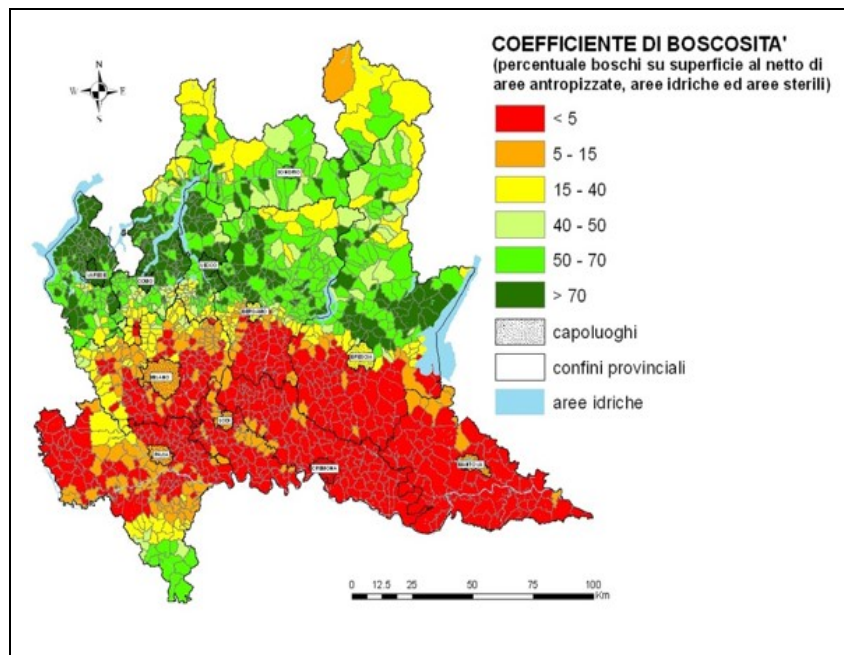


Figura 2.1 - Indice di boscosità dei comuni lombardi (Fonte: ERSAF, 2020).

I **castagneti** sono ampiamente diffusi su tutti i versanti montani e submontani dove, sia per le caratteristiche fisiologiche proprie del castagno (*Castanea sativa Mill*) cioè la grande capacità di rinnovazione, sia per l'azione dell'uomo che ne ha favorito la diffusione per l'ottenimento del frutto e del legname, si sovrappongono in maniera sostanziale ad altri soprassuoli. Il castagno è una specie dotata di una fortissima capacità **pollonifera**; i forti accrescimenti giovanili e la facilità della rinnovazione agamica hanno portato nei secoli a privilegiare il governo a ceduo. Nelle **peccete** domina nettamente dall'abete rosso (*Picea abies L.*), cui si affiancano soprattutto larice (*Larix decidua Mill.*), abete bianco (*Abies alba Mill.*) (nelle aree più umide), pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*) (nelle situazioni più calde) e castagno (nelle situazioni di passaggio tra piano submontano a montano). Le peccete montane rappresentano l'ossatura della **filiera bosco-legno**; tra le sue tipologie sono infatti concentrate le maggiori superfici forestali a indirizzo **produttivo**. La notevole plasticità dell'abete rosso si adatta perfettamente alle esigenze gestionali proprie della fustaia; la plasticità diminuisce con l'aumentare della quota, rendendo le peccete meno adatte a essere indirizzate con forme intensive di utilizzazione forestale. La diffusione massiva dell'abete rosso è stata agevolata nel tempo dall'azione dell'uomo (rimboschimenti e tagli intensivi).

Gli **orno-ostrieti** includono quelle formazioni forestali in cui la roverella (*Quercus pubescens Willd.*) diventa pressoché assente a scapito del carpino nero (*Ostrya carpinifolia Scop.*) che prevale accompagnato dal frassino orniello (*Fraxinus ornus L.*), principalmente su terreni calcarei. La forma di governo tipica è quella a **ceduo**. Il carpino nero, grazie alle capacità di

rapido accrescimento, è particolarmente sfruttato con le **utilizzazioni**, e ciò fa sì che i boschi si mantengano piuttosto giovani. In Regione Lombardia troviamo principalmente l'orno-ostrieto: (i) **di forra**, (ii) **di rupe**, (iii) **primitivo di falda detritica**, (iv) **tipico**. L'orno-ostrieto di forra si incontra prevalentemente lungo le forre di fiumi e torrenti. In questi ambienti, il carpino nero sopravvive grazie all'elevata umidità atmosferica e all'alternanza di zone sottoposte a continuo stillicidio con altre più aride dove prevalgono le pinete. L'orno-ostrieto di rupe si trova generalmente in aree caratterizzate da roccia nuda affiorante. Nelle forme primitive, è generalmente prevista la libera evoluzione naturale; dove ciò non è previsto, la gestione prevede unicamente interventi per la salvaguardia delle specie presenti. Nel caso invece della forma tipica, i soprassuoli sono tradizionalmente destinati a gestione più o meno intensiva per la produzione di legna da ardere (boschi cedui).

Il **faggio** (*Fagus sylvatica* L.) è una specie dotata di una notevole plasticità nell'adattarsi a diversi ambienti e necessita di un clima oceanico, caratterizzato da inverni non troppo freddi, e piogge concentrate prevalentemente durante il periodo primaverile e primaverile-estivo. Il faggio, infatti, riprende l'attività vegetativa all'inizio della primavera e, durante questo periodo, necessita di un'elevata disponibilità idrica. Il faggio possiede una spiccata tendenza a formare soprassuoli a distribuzione verticale monopiana con coperture regolari colme, e ben si presta alla gestione orientata alla funzione produttiva.

Nella **Figura 2.2** è indicata, in termini percentuali rispetto alla superficie forestale totale regionale, il contributo di ciascuna categoria forestale.

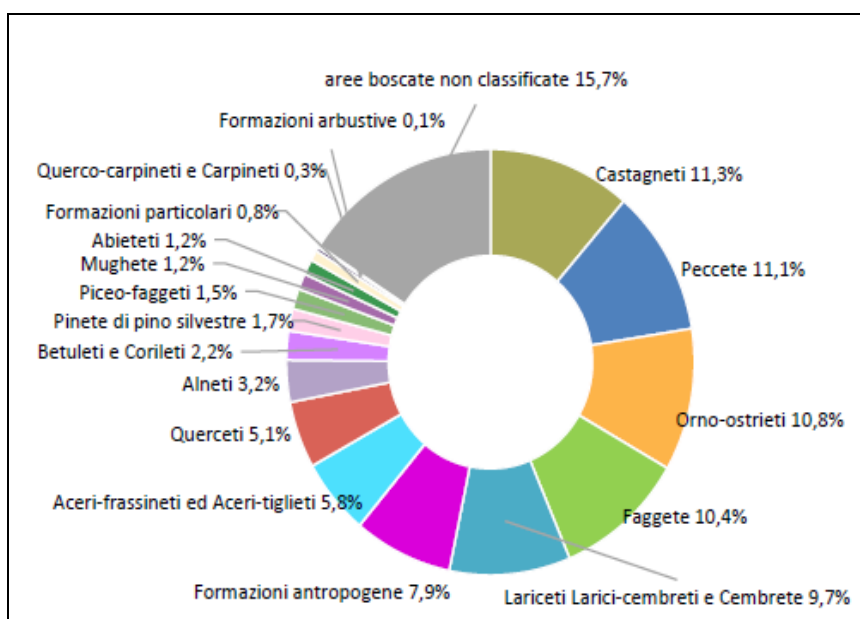


Figura 2.2 - Categorie forestali lombarde (% rispetto alla superficie forestale totale) (Fonte: ERSAF, 2020).

All'anno 2020, la **provvigione**⁵ unitaria attualizzata degli oltre 6×10^5 ha di superficie forestale presenti in Lombardia è stimata pari a $231,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Tale valore è stato calcolato partendo dal volume totale riportato nell'INFC⁶ del 2015 ($1,28 \cdot 10^8 \text{ m}^3$; $204,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), sommando l'**incremento medio annuo lordo** relativo al 2020 (3656737 m^3 ; $5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) e sottraendo il volume legnoso medio prelevato negli ultimi 5 anni con gli interventi selvicolturali (563737 m^3 ; $0,86 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Il confronto tra l'incremento e prelievo unitario evidenzia un risparmio annuale di massa legnosa di pari a $5,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (3125145 m^3).

2.2 Classi Attitudinali

I soprassuoli forestali, a seconda della **funzione** che sono chiamati ad assolvere, vale a dire dell'esigenza per cui sono gestiti, sono classificati in **classi attitudinali**. La classe attitudinale indica la **modalità di gestione del soprassuolo** individuata dal tecnico assestatore, e varia a seconda della predisposizione della particella:

- **Produzione** (30% della superficie forestale): i soprassuoli sono specificatamente gestiti per la produzione di legname; gli obiettivi gestionali sono: (i) massimizzazione del reddito compatibile con il funzionamento degli ecosistemi forestali, (ii) valorizzazione dell'offerta di biomassa legnosa per il potenziamento della filiera foresta-legno locale.
- **Protezione** (21% della superficie forestale): in tale classe sono compresi buona parte dei soprassuoli tradizionalmente classificati come "boschi di protezione", oltre ai soprassuoli localizzati in condizioni di elevato rischio idrogeologico. Gli obiettivi gestionali sono: (i) mantenimento e/o miglioramento dell'azione di protezione esercitata dalle formazioni forestali, programmare interventi di monitoraggio delle condizioni di sicurezza della vegetazione, (ii) aumento della riqualificazione forestale di ambiti degradati per diminuire il rischio di incendi. In maggiore dettaglio, il bosco possiede una valenza protettiva attraverso:
 - incremento della capacità di assorbimento dell'acqua da parte del suolo forestale rispetto al suolo nudo;
 - intercettazione della pioggia e della neve da parte delle chiome degli alberi;
 - aumento della velocità di penetrazione dell'acqua nel suolo forestale;
 - riduzione del deflusso della pioggia non intercettata e non trattenuta dal terreno;
 - riduzione del trasporto solido in sospensione per erosione di superficie;
 - incremento dell'evapotraspirazione.

⁵ Volume legnoso epigeo (fusto per conifere; fusto e rami per latifoglie) degli alberi vivi (in piedi) di un determinato bosco.
⁶ Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio.

- **Naturalistica** (20% della superficie forestale): è attribuita alle ZPS e ai SIC; gli obiettivi gestionali sono: (i) mantenimento e arricchimento della variabilità ecosistemica, valorizzazione faunistica, (ii) mantenimento delle formazioni che svolgono azione di protezione degli ecosistemi più delicati.
- **Turistico-ricreativa** (1% della superficie forestale): sono inclusi i soprassuoli particolarmente interessati da afflusso turistico; obiettivi gestionali sono: (i) valorizzazione delle aree a elevato impatto emotivo, (ii) mantenimento di un elevato livello di stabilità dei popolamenti e di elevate condizioni di sicurezza per i fruitori, (iii) mantenimento della qualità estetico-paesaggistica dei soprassuoli.
- **Paesaggistica** (4% della superficie forestale): comprende i soprassuoli che per tipologia forestale e/o particolare localizzazione topografica assumono un'elevata rilevanza paesaggistica (lariceti montani e primitivi, larici-cembreti, betuleti, soprassuoli ad elevata affluenza turistica,). Gli obiettivi gestionali sono: (i) mantenimento di formazioni paesaggisticamente pregevoli e capaci di diversificare gli aspetti cromatici del paesaggio (lariceti tipici, aceri-frassineti, betuleti, formazioni particolari del maggiociondolo e del sorbo degli uccellatori), (ii) limitazione della ricolonizzazione degli spazi aperti favorendo il mantenimento di alberi di pregio paesaggistico (monumenti naturali, ciliegi, alberi di margine e di confine).

Le foreste dovrebbero essere gestite per fornire in modo sostenibile un **“mix ottimale”** di servizi ambientali (compresa la conservazione della biodiversità), sociali, ed economici. Le opzioni gestionali potrebbero portare a risultati differenti, e ciò potrebbe causare l'insorgenza di compromessi (EASAC 2017). Per tale motivo, la gestione dovrebbe considerare la **“multifunzionalità”** delle foreste per bilanciare il loro valore ecologico, economico e sociale tenendo conto, allo stesso tempo, dei bisogni della società. La gestione forestale multifunzionale dovrebbe basarsi sui cosiddetti **“sistemi gestionali aperti”**, cioè sistemi caratterizzati da **diverse alternative gestionali** per evitare forme di gestione esclusive. In altre parole, i sistemi di gestione aperti rendono possibile la gestione delle foreste sia per fini produttivi, sia fini legati alla conservazione della biodiversità e del paesaggio, cambiando la gestione in base alle **esigenze specifiche**. In Lombardia, le foreste gestite secondo il principio della multifunzionalità e dei sistemi gestionali ammontano al 24% della superficie forestale totale.

2.3 Pianificazione e gestione forestale sostenibile

Uno dei criteri generalmente adottati a livello internazionale consiste nel garantire che, nel medio periodo, le utilizzazioni forestali non superino gli **incrementi netti**⁷ del bosco (UNECE/FAO 2011); se infatti nel breve termine le utilizzazioni possono eccedere gli incrementi, prelevando in periodi di mercato favorevole quanto precedentemente accumulato, il criterio adottato garantisce che nel medio termine non si verifichi un progressivo **depauperamento della provvigione** e, con essa, della fertilità stazionale e della futura disponibilità di risorse (Magnani e Raddi, 2014)⁸. Questo criterio viene spesso citato a riprova della sostenibilità della selvicoltura italiana, anche in sede di programmazione delle risorse forestali (MIPAAF, 2012): sulla base delle statistiche pubblicate dall'ISTAT (2014), infatti, a livello nazionale le utilizzazioni forestali ammonterebbero annualmente a non più del 22% degli incrementi; anche considerando le utilizzazioni extra-commerciali non registrate dalle statistiche, i prelievi non supererebbero un terzo dell'incremento annuo (MIPAAF 2012), contro un valore quasi doppio (65%) registrato mediamente in Europa. Ne deriva la convinzione diffusa che il tasso di utilizzazione delle foreste nazionali possa aumentare considerevolmente senza sostanziali rischi di sovrasfruttamento della risorsa (MSE, 2010).

La Lombardia è una delle Regioni europee con il più **basso rapporto prelievi/accrescimento**, inferiore al valore medio nazionale (Berton et al., 2017). Da un lato, le foreste lombarde diventano più dense e accrescono i valori di provvigione, dall'altro, il fatto che, pur con boschi dotati di maggiore provvigione, i prelievi di legname da opera si siano stabilizzati su valori estremamente bassi e che prevalgano i tagli di biomassa per fini energetici, indica che è in atto una tendenza opposta alle indicazioni delineate nella **Strategia forestale dell'Unione Europea**⁹, recante **“Una nuova strategia forestale dell'Unione europea: per le foreste e il settore forestale”**, secondo cui i principi di **“gestione attiva del patrimonio forestale”**, **“wood mobilization”** e **“approccio a cascata dei prodotti legnosi”** costituiscono i presupposti di base per lo sviluppo di sistemi energetici locali efficienti e innovativi (Ciccarese et al., 2015). L'importanza di tali principi è, peraltro, ampiamente riconosciuta sia nel recente **Testo unico in materia di foreste e filiere forestali**¹⁰ (approvato Decreto Legislativo 3 aprile 2018, n. 34 ed entrato in vigore il 05/05/2018), sia nell'**Accordo interregionale sul prelievo legnoso in ambito boschivo e sulla filiera legno**, stipulato nel 2016, che ha tra i suoi obiettivi: (i) l'incremento del prelievo legnoso annuo economicamente sostenibile, (ii) l'avvio alla gestione delle foreste

⁷ Incremento lordo (valore massimo raggiungibile in un determinato anno) di volume degli alberi vivi a cui è sottratto il volume perso per mortalità dovuta ad auto-diradamento, competizione per acqua, luce ed elementi nutritivi (pari a circa il 10%; Magnani e Raddi, 2014) e disturbi naturali (a esempio: incendi, schianti da vento, attacchi di insetti, parassiti, valanghe, o altro).

⁸ Inoltre, l'analisi delle relazioni esistenti fra incremento e parametri ambientali permette di comprendere quali siano i principali fattori limitanti per la crescita e la fissazione di carbonio degli ecosistemi, e di calibrare e validare strumenti di simulazione (Magnani e Raddi, 2014).

⁹ Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo n. 659 del 20 Settembre 2013.

¹⁰ Decreto Legislativo 3 aprile 2018, n. 34 (entrato in vigore il 05/05/2018).

abbandonate, (iii) la promozione della gestione dei boschi pubblici attraverso imprese private della filiera foresta-legno, (iv) la promozione della filiera foresta-legno locale e dell'impiego della biomassa legnosa a fini energetici in applicazione del principio di uso a cascata. Regione Lombardia, persegue questi obiettivi su scala territoriale attraverso i **Piani d'indirizzo forestale (PIF)**, e a scala locale, attraverso i **Piani di Assestamento forestale (PAF)**.

In ambito forestale, il principale riferimento legislativo è il **“Testo unico delle leggi in materia di agricoltura, foreste, pesca e sviluppo rurale”¹¹**.

Il Titolo IV in particolare, si pone l'obbiettivo della semplificazione e della razionalizzazione amministrativa delle attività selvicolturali, cioè delle attività legate alla gestione ordinaria del bosco, allo scopo di favorirne l'applicazione. Esso indica, inoltre, la sussidiarietà come strumento indispensabile a promuovere l'autogoverno del territorio silvo-pastorale da parte delle comunità locali. Ulteriori riferimenti legislativi sono la **Legge “Tutela della vegetazione nei parchi istituiti con Legge regionale”¹²** e il **Regolamento “Nuove Norme Forestali (NFR)”¹³**. Per eseguire attività selvicolturali conformi alle NFR quest'ultima prescrive la richiesta di autorizzazione: (i) per il taglio colturale dei boschi nei parchi regionali e nelle riserve regionali non dotate di Piano di Indirizzo Forestale (PIF) (come previsto dall'art. 50, della L.R. 31/2008) e (ii) nella forma di silenzio assenso dopo 60 giorni per le attività selvicolturali nei parchi naturali e nelle riserve regionali dotate di PIF oppure, (iii) denuncia di inizio attività, immediatamente esecutiva, in tutti gli altri casi. Le NFR richiedono i seguenti allegati tecnici all'istanze nel caso di attività selvicolturali:

- **progetto di taglio**, per le attività selvicolturali che interessino una superficie superiore a 2 ha.
- **relazione di taglio**, per le utilizzazioni o i diradamenti che interessino aree soggette a PAF e, talvolta, a PIF.
- **dichiarazione di conformità tecnica**, per attività selvicolturali da realizzare su superfici pari o superiori a 2000 m² nel caso di boschi di pianura o collina di competenza delle amministrazioni provinciali.

¹¹ Legge Regionale n.31 del 5 Dicembre 2008 che ha sostituito la Legge Regionale 27/2004 (Tutela e valorizzazione delle superfici, del paesaggio e dell'economia forestale).

¹² Legge Regionale n. 9/1977.

¹³ Regolamento Regionale 5/2007 che sostituisce il Regolamento Regionale 1/1993.

2.3.1 Piani di Indirizzo Forestali

La **legge Regionale 31/2008** prevede che la Provincia di Sondrio, le comunità montane, gli enti gestori dei parchi e la Regione Lombardia predispongano, per i territori di competenza, i PIF per la tutela delle superfici boscate e la valorizzazione delle risorse silvo-pastorali. Il PIF è il **piano di Settore del Piano Territoriale di Coordinamento** e, come tale, abbraccia tutto il territorio, indipendentemente dalla proprietà e per questo rientra nel novero di “piani forestali sovra-aziendale”, per distinguerlo dal PAF che ha invece come oggetto la singola proprietà o, raramente, più proprietà gestite in maniera collettiva. L'**articolo 47 comma 3** della suddetta legge afferma che il PIF rappresenta uno strumento:

- di analisi e di indirizzo per la gestione dell'intero territorio forestale ad esso assoggettato.
- di raccordo tra la pianificazione forestale e la pianificazione territoriale.
- di supporto per la definizione delle priorità nell'erogazione di incentivi e contributi.
- di individuazione delle attività selvicolturali da svolgere.

Il PIF, inoltre, in base all'**art. 43, commi 5 e 6, e all'art. 51, comma 4** della suddetta legge:

- individua e delimita le aree classificate “bosco”.
- regola i cambi di destinazione d'uso del bosco.
- regola il pascolo in bosco.

Con **Decreto n. 14926 del 30/11/2020**, la Direzione Generale Agricoltura, Alimentazione e Sistemi Verdi ha approvato le linee guida per l'aggiornamento dei PIF nel territorio di competenza diretta di Regione Lombardia. Nel 2020 sono stati approvati i PIF delle seguenti Comunità Montane (CM):

- CM Lario Orientale - Valle san Martino;
- CM Valle Seriana - Alta Valle;
- CM Valle Seriana - Clusone;
- CM Valle Seriana - Castione della Presolana;
- CM Valle Brembana - Alta valle;
- CM Val Chiavenna.

La superficie regionale con PIF vigente raggiunge l'82%, il restante 18% comprende le aree in cui il PIF non è ancora stato redatto o approvato e le aree dove questa pianificazione non è ancora stata avviata.

2.3.2 Piani di Assestamento Forestale

Secondo la visione classica, l'**assestamento forestale** si pone come obiettivo la gestione della risorsa legnosa al fine di massimizzarne i prodotti ritraibili, ottenendo un prodotto annuo, massimo e costante. Più modernamente, la gestione forestale tiene conto della **multifunzionalità degli ecosistemi forestali**. In tale contesto, la conoscenza degli ecosistemi forestali da un punto di vista ecologico-vegetazionale, dello stato del soprassuolo e delle esigenze economiche-sociali risulta fondamentale per garantire una corretta gestione nello spazio e nel tempo (Quadri, 2019).

Il PAF è lo **strumento di pianificazione e gestione delle foreste a livello locale**, attraverso il quale si esprimono i **principi dell'assestamento forestale**. Esso definisce le caratteristiche biologico-funzionali del bosco, per scegliere gli interventi di utilizzazione e miglioramento, in relazione alla massa legnosa presente e al suo ritmo di crescita. Il PAF contiene quindi i **criteri** e le **norme**, di natura tecnica ed economica, da attuare per la corretta gestione della risorsa forestale; in particolare, con il PAF si programmano:

- **progetti di taglio;**
- **progetti di rimboschimento;**
- **progetti di miglioramento della viabilità agro-silvo-pastorale (VASP);**
- **miglioramenti faunistici;**
- **piani di miglioramento degli alpeggi.**

Il PAF, inoltre, coopera insieme ad altri piani territoriali operanti a diversi **livelli di programmazione**, quali a esempio: (i) Agenda 2000 (europeo)¹⁴, (ii) Piano di Sviluppo Rurale (PSR, regionale)¹⁵, (iii) Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale ¹⁶(PTCP, provinciale), (iv) PIF (Comunità montana e provinciale) e (v) Piani di Governo del Territorio (PGT, comunale)¹⁷.

In sintesi, le componenti principali che costituiscono la struttura di un PAF sono:

- **relazione:** che comprende un'analisi di tipo territoriale, a livello sia generale, sia di singola **particella**¹⁸, sulle caratteristiche della superficie assestata (bosco, pascolo, incolto, viabilità, infrastrutture), e include tutti i dettagli che giustificano le scelte assestamentali (modalità di rilievo, interventi selvicolturali programmati, ecc.).

¹⁴ Programma d'azione, approvato al Consiglio Europeo di Berlino del 26 marzo 1999, che ha avuto come obiettivo principale tra il 2000 e il 2006 la riforma delle politiche comunitarie e un la definizione di un nuovo quadro finanziario per l'Unione Europea.

¹⁵ Programma settennale di finanziamenti europei che nasce dal Regolamento (UE) n. 1305/2013. Il programma è ormai la più importante fonte di contributi e di sostegno per gli imprenditori agricoli e forestali lombardi.

¹⁶ Definisce gli obiettivi generali relativi all'assetto e alla tutela del territorio a livello provinciale o sovracomunale.

¹⁷ Strumento urbanistico introdotto nella Regione della Lombardia dalla Legge Regionale n. 12 dell'11 marzo 2005. Il PGT è lo strumento di pianificazione urbanistica a livello comunale e ha lo scopo di definire l'assetto dell'intero territorio.

¹⁸ Porzione di soprassuolo omogenea in termini di specie prevalente, forma di governo, attitudine funzionale e modalità di gestione. La particella forestale costituisce l'unità tecnica funzionale e strutturale di base del PAF.

- **dati assestamentali:** sono generalmente organizzati in tabelle e fanno riferimento a: (i) superficie: produttiva forestale, produttiva non forestale e improduttiva, (ii) provvigione e incremento, (iii) piano dei tagli (prelievi prescritti¹⁹); (iv) piano dei miglioramenti forestali²⁰.
- **elaborati cartografici:** (i) carta assestamentale (1:25000); (ii) mappa catastale (1:10000); (iii) carta della viabilità e dei miglioramenti forestali (1:10000); (iv) eventuali carte tematiche facoltative (1:5000) relative, a esempio, a: uso del suolo, categorie e tipologie forestali.
- **regolamento di applicazione,** allegato alla relazione, è un riassunto normativo finale in cui vengono richiamate, per articoli, le disposizioni previste dal PAF.

In funzione delle **risorse tecniche, economiche e finanziarie** disponibili da parte del soggetto proprietario, il PAF ha una **durata prefissata** generalmente variabile da 10 a 15 anni, alla scadenza della quale perde immediatamente di efficacia, salvo diversa indicazione o revisione. Quest'ultima è generalmente eseguita nell'anno della scadenza, e ha lo scopo di aggiornare il Piano, controllando le variazioni di superficie e di provvigione avvenute nel precedente periodo di assestamento. La revisione del Piano deve, inoltre, analizzare lo stato di fatto del Piano precedente, individuando le eventuali cause della mancata applicazione dei prelievi prescritti dei miglioramenti forestali programmati.

La superficie regionale **assestata** è complessivamente pari a **145733 ha**, così suddivisa: (i) boschi: 52%, (ii) superfici improduttive: 18%, (iii) pascoli: 17% (iv) incolti produttivi: 12%. L'83,2% della superficie assestata (121172 ha circa) è di **proprietà pubblica**.

Con lo scopo di **facilitare e rendere uniforme** la gestione del territorio demaniale, infatti, ERSAF (in riferimento alla Legge Regionale 31/2008, in base alla quale le proprietà silvo-pastorali possono essere gestite anche in forma "semplificata") ha predisposto il cosiddetto "**Piano Forestale di Assestamento Semplificato**" (PAFS). Il PAFS è uno **strumento gestionale innovativo** che integra e completa gli strumenti della pianificazione già esistenti nelle proprietà silvo-pastorali di Regione Lombardia gestite dall'Ente, definendo un unico quadro di obiettivi e indirizzi di sviluppo, scelte gestionali e indicazioni operative. Secondo i "Criteri tecnico-amministrativi per la redazione dei piani di indirizzo forestale" (DGR 13899/2003), I piani di assestamento forestale semplificati (Portovenere, 2013):

¹⁹ I prelievi prescritti definiscono il volume massimo prelevabile dalla particella nel periodo di validità del PAF e possono essere espressi in termini planimetrici (superficie interessata dai prelievi, ha) o volumetrici (volume cormometrico lordo prelevabile, m³). Per ulteriori dettagli sui termini tecnici qui riportati si rimanda al capitolo successivo.

²⁰ Al fine di mantenere il più possibile efficaci le funzioni svolte dai boschi si effettuano interventi selvicolturali che consistono principalmente in cure colturali (ripuliture, sfolli e diradamenti), conversioni a fustaia e interventi fitosanitari di bonifica a seguito di avversità abiotiche (fuoco, vento, neve) o biotiche (attacchi parassitari) e altri interventi simili.

- consistono in strumenti di analisi e, soprattutto, di gestione selvicolturale più economici, agili, relativi alle problematiche legate ai boschi che svolgono in prevalenza altre funzioni;
- prevedono specifici studi settoriali riguardanti la ricostituzione boschiva, la valorizzazione naturalistica, l'analisi degli aspetti di varietà ecologica e di diversità ambientale, la tutela e conservazione degli ambiti a rilevanza storico-culturale o faunistica od altro ancora. I rilievi dendrometrici, il calcolo o la stima delle provvigioni e delle riprese sono effettuati con criteri speditivi.

Il PAFS, inoltre, svolge la **triplice funzione** di:

- **PAF** ai fini della pianificazione forestale;
- misura di **conservazione** per le aree classificate come Siti di Importanza Comunitaria (SIC), Zone di Protezione Speciale (ZPS), e Rete Natura 2000, ai sensi della DGR 08.08.2003 n. 14.106 allegato B;
- piano di **gestione** ai fini della **certificazione di gestione forestale**.

Il PAFS è stato approvato dalla Giunta Regionale il 16 dicembre 2009, dopo essere stato sottoposto positivamente a Valutazione Ambientale Strategica (VAS); il suo periodo di validità è di **15 anni (2009-2023)**. In tale periodo, i PAF esistenti conservano la loro validità specifica, purché non contrastino con quanto disposto e previsto dal PAFS stesso. Quest'ultimo, infatti, rappresenta un completamento e un perfezionamento dei contenuti e della struttura dei PAF, semplificando le fasi di raccolta dati e di analisi, tenendo in considerazione gli aspetti relativi alla conservazione della biodiversità.

Gli interventi previsti dal PAFS devono essere effettuati nel **breve-medio periodo**, limitando qualsiasi impatto negativo sull'ambiente e seguendo **linee guida specifiche** che consentano di migliorare la **struttura** e la **composizione del soprassuolo** salvaguardando al contempo le risorse idriche e la biodiversità, anche attraverso la tutela delle aree umide, il mantenimento delle aree prato-pascolive, la continuazione o la ripresa dei prelievi legnosi e di pratiche colturali estensive, e il controllo dello sviluppo della vegetazione arborea-arbustiva.

Il PAFS è costituito dai seguenti **documenti**:

- **Relazione tecnica** e relativi allegati:
 - Allegato 1: schede descrittive delle macro-particelle²¹;
 - Allegato 2: riepiloghi dei dati del piano;

²¹ Insieme di particelle non necessariamente contigue ma omogenee in termini di composizione e struttura della vegetazione.

- Allegato 3: cartografia (carte delle macro-particelle; carta delle tipologie forestali; carta degli habitat di Natura 2000; Carta della viabilità agro-silvo-pastorale²² e dei miglioramenti forestali; carta degli elementi ad alto valore di conservazione);
 - Allegato 4: Registri e indicatori per il monitoraggio;
 - Allegato 5: Regolamento di applicazione del Piano.
- **Misure di conservazione** relative a specie ed habitat.

Al 2020, i PAF in vigore in regione Lombardia sono 87, di cui **81 ordinari** e **6 semplificati**.

Il 54,2% della superficie dei boschi assestati è governato a **fustaia**, mentre la forma di governo a **ceduo** occupa il 22,2%. La frazione restante è caratterizzata da: (i) forma di governo **mista ceduo-fustaia** (3,4%), (ii) **ceduo in conversione ad alto fusto** (2,3), boschi lasciati a “**libera evoluzione naturale**” (0,8%), (iv) **boschi non classificati**²³. La **Tabella 2.2** riporta l’elenco delle categorie forestali presenti nei boschi assestati con indicazione della relativa superficie.

Tabella 2.2 - Categorie forestali presenti nei boschi assestati di Lombardia e relativa superficie.

Categoria forestale	Superficie ha (% sup. tot)
Pecceta	14155 (18,9)
Lariceti-Cembrete	13795 (18,4)
Faggete	9422 (12,6)
Orno-ostrieti	7218 (9,6)
Castagneti	2795 (3,7)
Acero-tiglio-frassineto	2362 (3,1)
Piceo-faggeti	2338 (3,1)
Abieteti	1847 (2,5)
Pinete di pino silvestre	1813 (2,4)
Alneti	1801 (2,4)
Betuleti-corileti	1687 (2,3)
Formazioni antropogene	1654 (2,2)
Querceti	1382 (1,8)
Mughete	310 (0,4)
Formazioni particolari	60 (0,1)
Querco-carpineti	4 (0,0)
Formazioni arbustive	1 (0,0)
Non classificato	7142 (9,5)
n.p	5222 (7,0)
Totale	75008 (100)

²² L’articolo 59 della Legge “Testo unico delle leggi regionali in materia di agricoltura, foreste, pesca e sviluppo rurale” definisce le strade agro-silvo-pastorali: “*infrastrutture finalizzate a un utilizzo prevalente di tipo agro-silvo-pastorale non adibite al pubblico transito. Il transito è disciplinato da un regolamento comunale, approvato sulla base di criteri stabiliti dalla Giunta regionale*”. La “Direttiva relativa alla viabilità locale di servizio all’attività agro-silvo-pastorale” approvata dalla Giunta Regionale, ha fornito ai Comuni, alle Comunità Montane, e alle Amministrazioni Provinciali, le linee di indirizzo in materia di viabilità agro-silvo-pastorale.

²³ Aree boscate non rientranti nelle categorie forestali adottate e riconosciute da Regione Lombardia.

2.4 Interventi selvicolturali: istanze di taglio e prelievi effettuati

A partire da marzo 2011, Regione Lombardia ha messo a disposizione il **Sistema Informatizzato di Istanza di Taglio Bosco (SITAB)** per denunciare il **taglio colturale**²⁴. Per interventi relativi all'arboricoltura da legno (a esempio pioppeti) e alla "trasformazione del bosco"²⁵ l'istanza di taglio non è necessaria. Nel 2021 sono state registrate **15600 istanze di taglio**, 127 delle quali presentate da operatori di pubblico servizio per l'esecuzione di tagli di manutenzione di elettrodotti, strade e ferrovie. L'87,5% di tali istanze ha richiesto **segnalazione certificata di inizio attività (SCIA)**²⁶, lo 0,7% l'autorizzazione dell'Ente forestale competente, mentre l'11,8% ha seguito la procedura per silenzio assenso. Il volume denunciato il taglio - ragionevolmente pari a quello effettivamente prelevato - ammonta a 531238 m³ (70,3%: forma di governo a ceduo e mista ceduo-fustaia; 29,7%: fustaia) per una superficie complessiva pari a 7062 ha (ERSAF, 2020).

I volumi richiesti al taglio e la superficie si sono ridotti rispetto all'anno precedente rispettivamente del 14,8% e del 17,5%; tale riduzione è stata principalmente causata dalla notevole quantità di volume legnoso prelevato nel 2019 sia a causa della **tempesta Vaia** (28-30 ottobre 2018) che ha colpito prevalentemente le province di Brescia, Sondrio e Bergamo, sia a causa della pandemia da Covid-19 che ha compromesso il normale svolgimento degli interventi selvicolturali.

L'impiego prevalente del legname è quello **energetico** (85,2% del volume totale), di cui il 37,7% è stato dichiarato per **autoconsumo** e la restante quota per uso **commerciale**. Il volume destinato a **legname da opera** ed altri usi commerciali rappresenta il 13,1% del totale, di cui solo il 2,9% destinato all'autoconsumo. Il restante 2% del volume totale è stato dichiarato **"inutilizzabile"**.

A **livello provinciale**, le variazioni più consistenti di riduzione del volume di legname richiesto al taglio riguardano le province di Brescia e Sondrio (rispettivamente -35% e -38% rispetto al 2019). La provincia dove è stato richiesto più legname è quella di **Brescia** (128888 m³; **24,3%** del totale lombardo), seguita dalla provincia di **Varese** (95800 m³; **18%**) e **Bergamo** (83806 m³; **15,8%**). Queste tre province da sole costituiscono il 58% del legname richiesto al taglio dell'intera regione. La **Figura 2.4** mostra l'andamento (periodo: 2007-2020) del volume legnoso richiesto al

²⁴ Taglio ordinariamente eseguiti su una data area forestale per garantire la corretta gestione del soprassuolo, come definito da: (i) Codice sul Paesaggio (D. Lgs n. 42/2004, articoli 136, 142 e 149); (ii) Legge sull'orientamento forestale dello Stato (D. Lgs n. 227/2001, articolo 6); (iii) Testo Unico Regionale sull'Agricoltura e le Foreste (Legge Regionale n. 31/2008, articolo 50).

²⁵ Con il termine "trasformazione del bosco" si indicano tutti quegli interventi effettuati per cambiare la destinazione d'uso del suolo (da bosco a terreno urbanizzato, agricolo o altro). Poiché il bosco è un bene vincolato dallo Stato sotto il profilo paesaggistico e naturalistico, la "trasformazione del bosco" è vietata, salvo autorizzazioni rilasciate compatibilmente con la conservazione della biodiversità, la stabilità del terreno, la regimazione delle acque, la difesa da valanghe e caduta massi, la tutela del paesaggio, l'azione frangivento e di igiene ambientale.

²⁶ Dichiarazione amministrativa da presentare in Comune che permette alle imprese di iniziare, modificare o cessare un'attività produttiva (artigianale, commerciale, industriale).

taglio a livello regionale complessivo e suddiviso tra forma di governo a ceduo e mista, e quella ad alto fusto, mentre la **Figura 2.5** riporta, in termini %, il volume legnoso richiesto al taglio suddiviso in base alla forma di governo (ceduo e mista ceduo-fustaia; alto fusto) e alla specie.

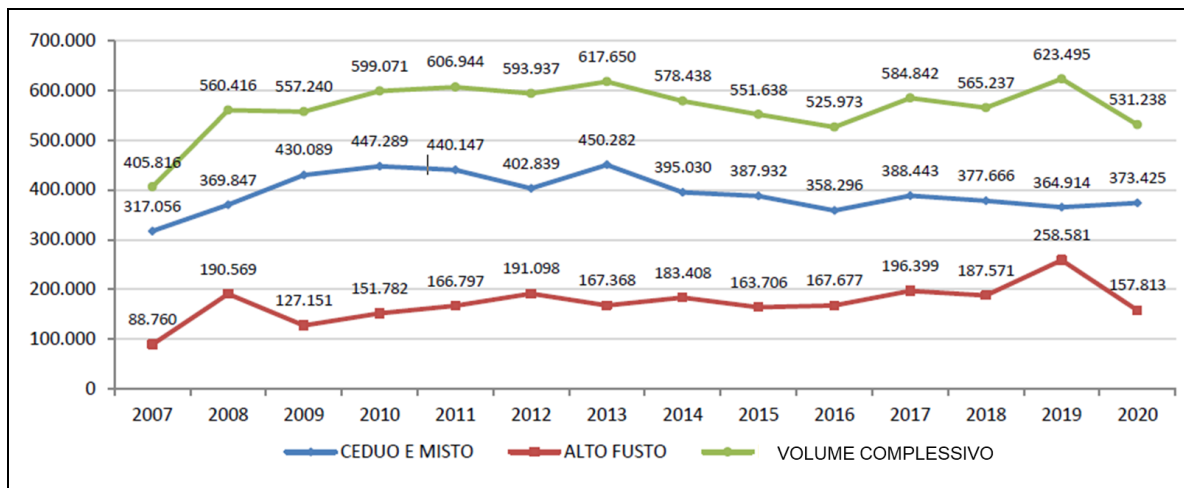


Figura 2.3 - Andamento del volume legnoso richiesto al taglio (periodo: 2007-2020) (Fonte: ERSAF, 2020).

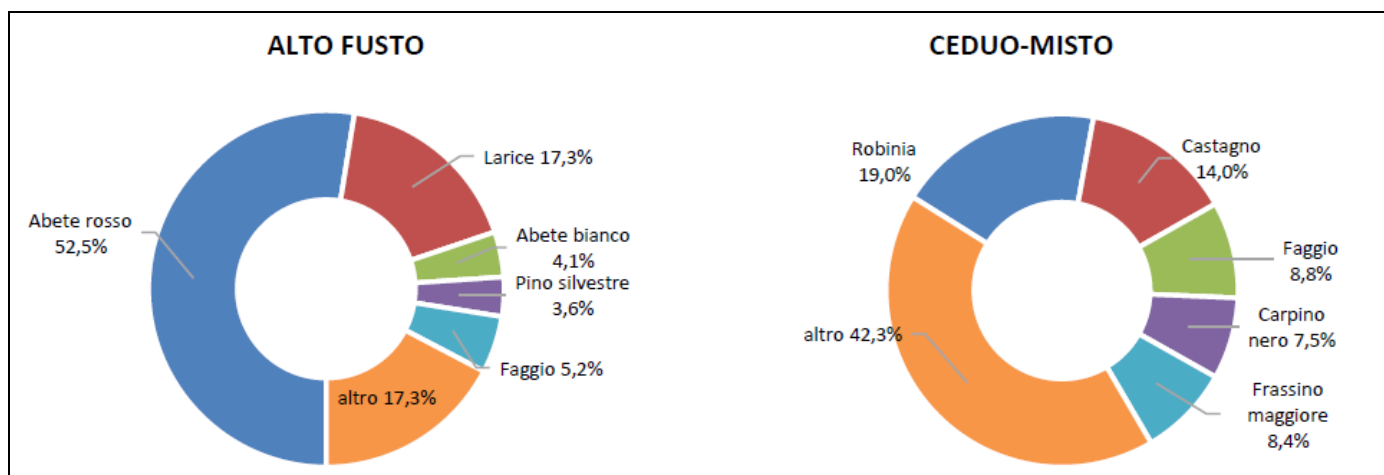


Figura 2.4- Volume legnoso richiesto al taglio in base a forma di governo e specie (Fonte: ERSAF, 2020).

Al 2020, il volume legnoso richiesto al taglio nella forma di governo a fustaia ammonta a **157813 m³** (-39,0% rispetto al 2019), con una superficie complessiva di **1693 ha** (dimensione media superfici sottoposte a taglio: 1,1 ha; volume prelevato per unità di superficie: **93,2 m³·ha⁻¹**). Per la forma di governo mista **ceduo-fustaia e ceduo**, invece, il volume legnoso richiesto al taglio è pari a **373425 m³** (+2,3% rispetto al 2019; superficie complessiva: **5369 ha**; dimensione media superfici sottoposte a taglio: 0,38 ha; volume prelevato per unità di superficie: **69,6 m³·ha⁻¹**). La **specie arborea** maggiormente interessata dai prelievi è l'**abete rosso** (17,1%; **91325 m³**), mentre al secondo posto si colloca **robinia** (13,6%; **72432 m³**), seguita da: (i) **castagno**, (ii) **faggio**

e (iii) frassino. La **tipologia di taglio** maggiormente effettuata è quella a **maturità del popolamento** (63,9% del volume legnoso complessivamente prelevato) (**Figura 2.5**).

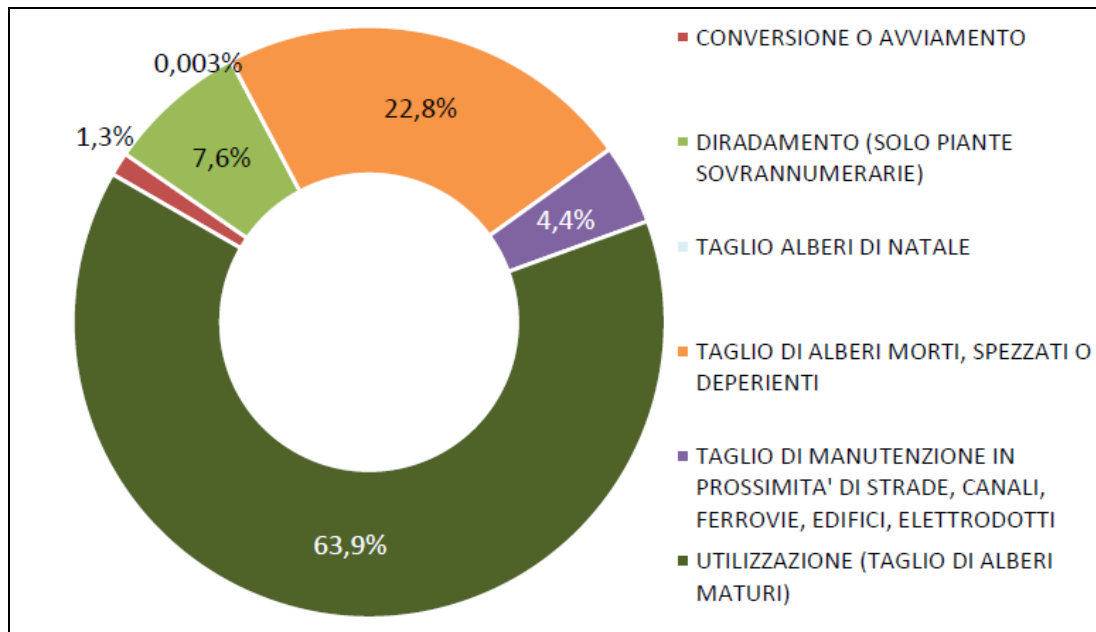


Figura 2.5 - Ripartizione del volume prelevato per tipologia di taglio effettuato (Fonte: ERSAF, 2020).

3. MATERIALI E METODI

3.1 Database “Scheda Rilievo”

La prima attività ha riguardato la raccolta di dati relativi a **493 particelle forestali** censite in **7 PAF** della **Comunità Montata Valtellina di Tirano e del Consorzio Forestale Alta Valtellina**²⁷ (superficie forestale complessiva: 10542,9 ha) (Tabella 3.1) e la loro organizzazione in un **Database 1 (input)** informatizzato, denominato “Scheda Rilievo”, predisposto in ambiente MS Office Excel365®. Nel Database 1 ciascuna particella viene rappresentata in un record, dotato di **104 differenti campi**, **73** dei quali contenenti informazioni di *input* e **31** contenenti calcoli per la **verifica delle informazioni riportate nel PAF**. I dati di input sono contenuti in celle con sfondo verde chiaro e testo nero e, in quanto tali, sono modificabili dall’operatore; viceversa, i dati derivanti da calcoli per la verifica delle informazioni riportate nel PAF sono contenuti in celle con sfondo giallo e testo rosso e, in quanto tali, non sono modificabili.

Complessivamente, dunque, il Database è costituito da 493 record x 104 campi = **51272 informazioni**.

Tabella 3.1 - PAF analizzati: comune proprietario, periodo di validità, numero di particelle e superficie forestale.

PAF					
N.	Comune proprietario	Anno Entrata in vigore	Anno scadenza	Particelle	
				Numero (-)	Superficie forestale (ha)
1	Aprica	2007	2021	24	571,6
2	Grosio	2005	2019	139	2807,9
3	Grosotto	2017	2031	36	1146,9
4	Lovero, Mazzo, Tovo S. Agata, Vervio	2009	2023	30	559,8
5	Sondalo	2018	2032	66	2112,8
6	Valdidentro	2021	2035	135	2038,8
7	Valfurva	2016	2030	63	1305,2
Totale	-	-	-	493	10542,9

Per ciascuna particella, sono stati estratti i dati sia propriamente contenuti nei PAF (55 dati assestamentali), sia relativi agli interventi selvicolturali (18 dati, riportati nelle istanze di taglio), dal **2005** (anno di entrata in vigore del PAF più vetusto) al **2021** (dati disponibili più recenti).

²⁷

I PAF sono stati concessi al Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA) dalla Comunità Montana Valtellina di Tirano (<https://www.cmtirano.so.it/hh/index.php>) e dal Consorzio Forestale Alta Valtellina (<https://www.cfav.it/>) nell’ambito del Progetto di Ricerca “Approcci innovativi per la valutazione della fornitura di Servizi Ecosistemici in foreste Lombarde” (USEFOL; 07/2020-07/2023), finanziato da Regione Lombardia.

Il Database permette inoltre, mediante **selezione a inizio record** (digitando una "x") di visionare nell'estremità superiore del foglio di lavoro tutti i dati relativi alla particella selezionata (Tabella 3.2).

3.1.1 Dati assestamentali

Ciascun PAF è organizzato in una serie di "schede particellari", ognuna delle quali si riferisce a una specifica particella. A sua volta, ciascuna scheda si compone di differenti tabelle contenenti dati specifici disponibili per la consultazione, la modifica e l'aggiornamento. I dati raccolti e inseriti nel Database Scheda Rilievo sono sia di natura amministrativa, sia relativi alle caratteristiche compositive e gestionali e morfologico-strutturali. La Figura 3.1 riporta, a esempio, una scheda particellare di un PAF analizzato.

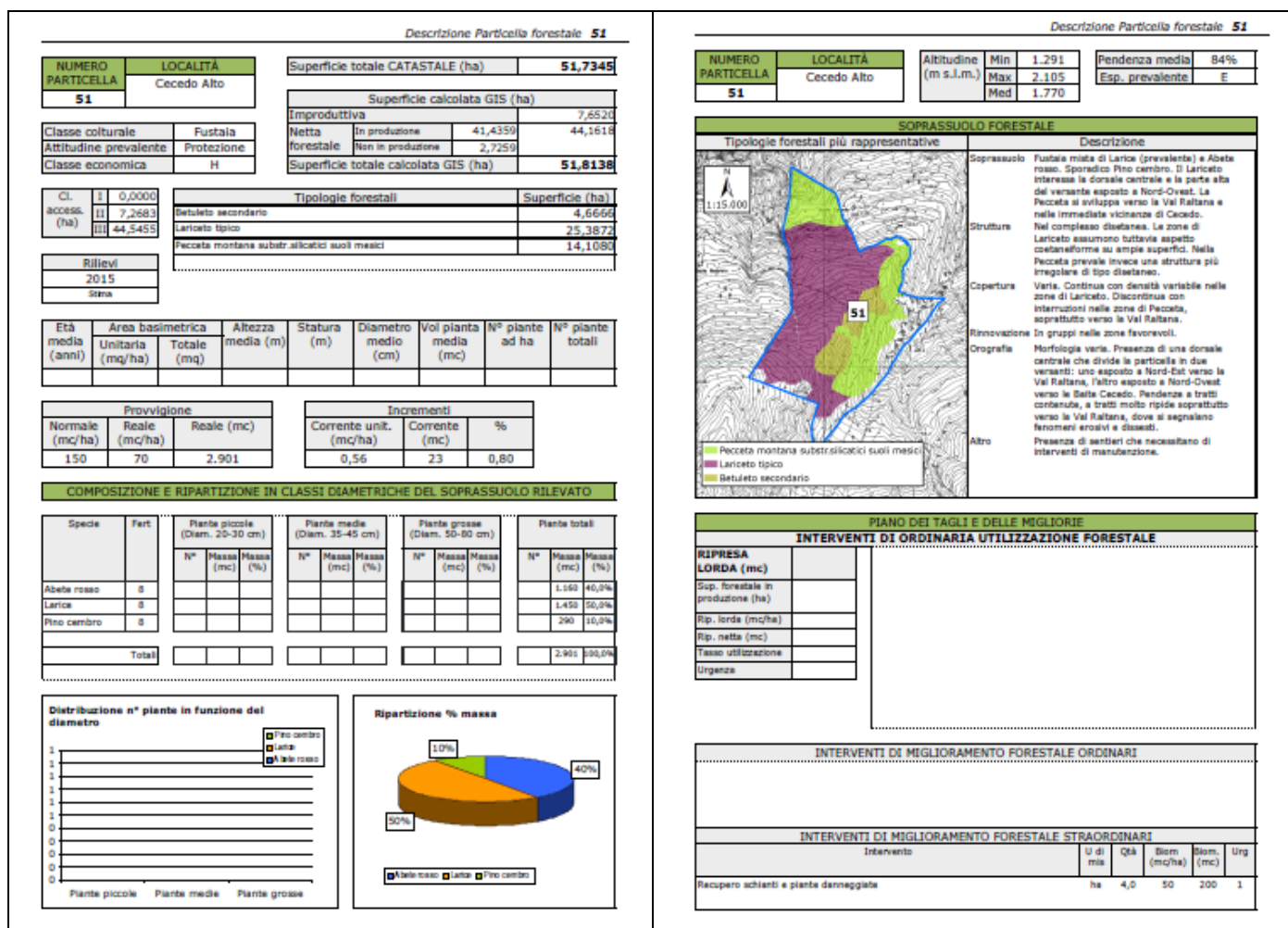


Figura 3.1 - Esempio di scheda particellare contenuta in uno dei PAF analizzati.

I dati di natura amministrativa sono:

- **codice particella:** identifica una specifica particella all'interno del PAF. Le particelle sono classificate in ordine progressivo con un codice numerico (o alfanumerico in taluni casi) partendo dal numero 1 (e dalla lettera a nel caso di codice alfanumerico);
- **nome del PAF** con cui la particella è gestita (generalmente la dicitura è la seguente: "Piano di Assestamento Forestale del Comune di...");
- **soggetto proprietario:** soggetto che detiene la proprietà della particella (è sempre rappresentato da Comune, unione di Comuni, o Consorzio Forestale);
- **comune censuario:** comune in cui è fisicamente localizzata la particella. Nella maggior parte dei casi, Comune censuario e Comune proprietario coincidono;
- **località:** nome gergale del luogo o della frazione all'interno del Comune in cui è localizzata la particella;
- **ente gestore:** soggetto (unione di Comuni, Consorzio Forestale, Comunità Montana) preposto alla gestione tecnico-amministrativa della particella;
- **anno di esecuzione dei rilievi sperimentali:** anno in cui sono stati effettuati i rilievi dendro-auxometrici;
- **modalità di esecuzione dei rilievi:** modalità con cui i rilievi sono stati condotti dall'asestatore incaricato alla redazione del PAF²⁸;
- **anno di entrata in vigore del PAF:** anno in cui le prescrizioni contenute nel PAF diventano attive e il nuovo PAF sostituisce quello precedente²⁹;
- **anno di scadenza del PAF:** anno in cui il PAF termina il suo periodo di validità;
- **inclusione in parchi regionali/nazionali;**
- **inclusioni in parchi o riserve UNESCO;**
- **inclusione in SIC** (ed eventuale denominazione del SIC);
- **inclusione ZSC** (ed eventuale denominazione della ZSC);
- **inclusione in ZPS** (ed eventuale denominazione della ZPS);

I dati relativi alle **caratteristiche gestionali, compositive e morfologiche** sono:

²⁸ Le modalità di esecuzione dei rilievi possono essere: (i) cavallettamento totale: rilievo, mediante cavalletto dendrometrico, dei diametri di ogni singolo albero con diametro a petto d'uomo maggiore rispettivamente di 8 cm e 17,5 cm per ceduo e fustaia e delle altezze di ogni singolo albero; (ii) cavallettamento parziale: individuazione di un'area (area di saggio) all'interno della particella dove la vegetazione risulti essere omogenea e rappresentativa dell'intera particella in esame. In tale area vengono condotte le misure di diametro e altezza e i risultati ottenuti vengono successivamente rapportati all'area dell'intera particella in esame; (iii) stima: la provvigione totale viene stimata senza eseguire alcuna misurazione, a vista oppure mediante confronto con particelle limitrofe caratterizzate dalle medesime caratteristiche ecologico-ambientali e dendro-auxometriche; (iv) mediante relascopio: diametro e altezza degli alberi sono rilevati impiegando uno strumento chiamato "Relascopio di Bitterlich".

²⁹ L'anno di entrata in vigore è generalmente il successivo a quello di esecuzione dei rilievi sperimentali.

- **classe colturale:** esprime il tipo di **struttura** che caratterizza il soprassuolo. L'individuazione della classe colturale è effettuata principalmente distribuendo su un grafico cartesiano le classi diametriche in ascissa e la relativa consistenza numerica in ordinata (curva del popolamento arboreo);
- **classe attitudinale;**
- **tipologia forestale prevalente:** rappresenta la tipologia forestale più rappresentativa (in termini volumetrici);
- **altre/a tipologie/a forestali/e;**
- **superficie totale lorda (ha):** superficie complessiva della particella, data dalla somma di: (i) superficie forestale in produzione; (ii) superficie forestale non in produzione; (iii) superficie produttiva non forestale e (iv) superficie improduttiva;
- **superficie forestale di tipologia forestale prevalente (ha):** superficie ricoperta dalla tipologia forestale prevalente;
- **superficie forestale di altra tipologia forestale (ha):** eventuale superficie ascrivibile ad altre tipologie forestali;
- **superficie forestale in produzione (ha):** quota parte di superficie forestale utilizzabile per scopi produttivi (**superficie di riferimento** per il calcolo delle rese di biomassa e C);
- **superficie forestale non in produzione (ha):** quota parte di superficie forestale ricoperta da novelleti e spessine³⁰;
- **superficie produttiva non forestale (ha):** quota parte di superficie lorda a destinazione produttiva ma non ricoperta da bosco (a esempio: prati e pascoli);
- **superficie improduttiva (ha):** quota parte di superficie lorda non ascrivibile ad alcuna delle classificazioni precedenti (a esempio: superficie ricoperta da rocce e falde detritiche);
- **classe di fertilità per specie legnosa:** secondo la classificazione corrente varia da un minimo di 1 (classe di fertilità massima) a un massimo di 9 (classe di fertilità minima); le classi sono espresse con valori unitari (a esempio: 1, 2, 3, ecc.) e tali valori sono attribuiti in base alla disponibilità di elementi nutritivi presenti nel suolo;

³⁰

Il "novelletto" rappresenta il primo stadio cronologico di sviluppo della fustaia, e si caratterizza per la presenza di rinnovazione, anche se in modo non necessariamente uniforme, che si afferma progressivamente. L'altezza delle piante è inferiore a 3 m. La "spessina" è stadio cronologico successivo, in cui la rinnovazione è affermata e, in caso di copertura colma, iniziano i fenomeni di compenetrazione delle chiome e quindi l'autopotatura dei rami basali. Verso la fine del periodo di spessina, in mancanza di cure colturali, comincia a manifestarsi una certa mortalità per disseccamento o schianti; L'altezza delle piante varia da 3 a 10 m.

- **classe di fertilità media:** come la precedente, ma espressa come valore medio riferito a tutte le specie arboree presenti;
- **superficie lorda (ha) in classe di accessibilità I³¹:** superficie pianeggiante distante da strade forestali per non più di 100 m di dislivello e raggiungibile con piste forestali di lunghezza massima pari a 1000 m;
- **superficie lorda (ha) in classe di accessibilità II:** superficie con pendenza massima pari al 10%, distante da strade forestali per più di 1000 m e per un dislivello compresa tra 100 e 300 m;
- **superficie lorda (ha) in classe di accessibilità III:** superficie non ricadente in alcuna delle casistiche sopra definite.
- **altitudine minima (m slm);**
- **altitudine massima (m slm);**
- **altitudine media (m slm):**
- **pendenza prevalente (°):** pendenza uguagliata o superata per più del 75-80% della superficie lorda;
- **esposizione prevalente:** esposizione uguagliata o superata per più del 75-80% della superficie.

In ultimo, i dati relativi alle caratteristiche **dendro-auxometriche** sono:

- **provvigione totale fustaia (m³)** nell'anno di entrata in vigore del PAF³², calcolata mediante **cavallettamento o stimata**;
- **provvigione unitaria fustaia (m³)** nell'anno di entrata in vigore del PAF;
- **provvigione per specie legnosa prevalente (m³)** nell'anno di entrata in vigore del PAF;
- **incremento annuo lordo totale (m³)** nell'anno di entrata in vigore del PAF³³;

³¹ Nonostante nel 2014 con apposito decreto di Regione Lombardia sia stata introdotta una nuova classificazione relativa all'accessibilità delle particelle forestali, nei PAF oggetto di indagine la classificazione adottata è ancora quella precedente, illustrata nel documento tecnico "Criteri per la redazione dei Piani di Assestamento" introdotto da Regione Lombardia nel 1990.

³² La provvigione esprime il volume cormometrico lordo degli alberi vivi che costituiscono il soprassuolo. Per le conifere il dato esprime il volume del tronco da lavoro comprensivo di corteccia e scarti di lavorazione degli alberi caratterizzati da diametro a petto d'uomo (1,3 m da terra) uguale o maggiore di 17,5 cm, e misurato dal limite superiore della ceppaia (30 cm da terra) fino a un diametro di sveltamento in punta di 7 cm. Per affinità climatica, il volume delle fustaie di conifere è stimato sulla base di specifiche tavole di cubatura messe a punto in Trentino-Alto-Adige e relative alle specie più diffuse (*Picea abies* L., *Abies alba* Mill., *Larix decidua* Mill. e *Pinus sylvestris* L.). Per le fustaie di latifoglie il volume cormometrico lordo è tutto stimato sulla base delle tavole di cubatura del faggio (*Fagus Sylvatica* L.) Per i cedui, il volume è sempre stimato in maniera approssimativa in base a valori standard tabulati per tipologia forestale, ed è espresso sempre come volume cormometrico lordo (fatto salvo rari casi di soprassuoli di castagno gestiti per produzione di legna da opera; in questo caso il volume è calcolato prendendo in considerazione piante con diametro a petto d'uomo maggiore o al più uguale a 8 cm).

³³ Calcolato dal tecnico forestale come media aritmetica dell'incremento annuo relativo agli ultimi 10 anni e assunto costante nel tempo. L'incremento annuo lordo per unità di superficie (m³·ha⁻¹) e il tasso di incremento (%), non riportati

- **età media piante (anni):** rapporto tra la somma degli anni di tutti gli alberi e il numero degli alberi totali. Tale grandezza è utile per analizzare le condizioni di sviluppo della particella ed il suo stato di maturità;
- **altezza media piante (m):** media aritmetica tra altezze qualsiasi rilevate in bosco senza alcun criterio;
- **statura (m):** rapporto tra la somma delle altezze degli alberi modello e il numero degli alberi “modello”³⁴;
- **diametro medio piante (m):** rapporto tra la somma di tutti i diametri degli alberi presenti nella particella (o in un’area di saggio³⁵) e il numero di piante considerate;
- **volume pianta media (m³):** volume dell’albero la cui classe diametrica³⁶ ricorre con maggior frequenza all’interno della particella.
- **area basimetrica totale (m²):** somma delle aree basimetriche³⁷ (calcolate a petto d’uomo) degli alberi con diametro maggiore o al più uguale a 17,5 cm e 8 cm rispettivamente per fustaia e ceduo;
- **area basimetrica unitaria (m²·ha⁻¹):** rapporto tra area basimetrica totale (m²) e superficie forestale in produzione (ha);
- **numero di piante per unità di superficie:** numero di piante che, a petto d’uomo, risultano avere diametro maggiore o uguale a 8 cm nel caso dei cedui e a 17,5 cm nel caso delle fustaie³⁸;
- **prelievo lordo annuo prescritto (m³·anno⁻¹):** comunemente chiamato anche “ripresa lorda prescritta” indica il volume massimo (espresso come cormometrico lordo) annualmente prelevabile in base alla programmazione degli interventi selvicolturali³⁹;
- **prelievo netto annuo prescritto (m³·anno⁻¹):** comunemente chiamato anche “ripresa netta prescritta”, indica il volume massimo (espresso come cormometrico netto) annualmente prelevabile in base alla programmazione degli interventi selvicolturali. Tale

nei PAF, sono stati calcolati, rispettivamente come rapporto tra l’incremento totale (m³) e la superficie forestale in produzione (ha), e come rapporto tra l’incremento annuo lordo e la provvigione.

³⁴ Albero che ha sviluppato un maggiore accrescimento in termini di diametro e altezza rispetto agli altri individui presenti nella particella. Solitamente per ogni particella vengono rintracciati 5/6 alberi modello.

³⁵ Area rappresentativa, scelta dall’asestatore, solitamente di forma circolare con raggio di 10 m.

³⁶ Valore medio del diametro (a petto d’uomo) relativo all’intervallo di valori che caratterizza la classe. Ad esempio, la classe diametrica “20 cm” (o classe diametrica 1) include gli alberi che hanno un diametro a petto d’uomo compreso tra 17,5 cm e 22,5 cm, con valore medio pari a 20 cm. La classe diametrica 25 (o classe diametrica 2) include gli alberi che hanno un diametro a petto d’uomo compreso tra 22,5 cm e 27,5 cm, con valore medio pari a 25 cm, e così via.

³⁷ Ai fini di calcolo, la sezione di fusto è assimilata ad una circonferenza.

³⁸ Il numero di piante totali, non riportato nei PAF, è stato calcolato come prodotto tra numero di piante per unità di superficie forestale in produzione (ha) e superficie forestale in produzione.

³⁹ Contestualmente, è stato calcolato il tasso di utilizzazione (%), come rapporto tra il prelievo lordo annuo prescritto (m³·anno⁻¹) e la provvigione totale all’anno di entrata in vigore del PAF (m³). Tale grandezza, come il tasso di incremento, è fondamentale per descrivere le caratteristiche della particella e indirizzare gli interventi selvicolturali secondo i criteri di GFS.

volume rappresenta quello che l'industria di prima trasformazione paga all'impresa boschiva/consorzio forestale che ha eseguito l'intervento selvicolturale, ed è calcolato sottraendo al volume cormometrico lordo il volume della corteccia e degli scarti di lavorazione, in percentuale variabile tra il 15% (*Picea abies* L.) e il 25% (*Larix decidua* Mill.).

3.1.2 Volume legnoso prelevato

I dati relativi al volume legnoso prelevato con gli interventi selvicolturali, non disponibili nei PAF, sono stati ricavati nelle **istanze di taglio** (file .pdf e .xlsx). Per **ciascun evento di taglio** sono stati ricavati:

- **volume cormometrico lordo prelevato (m³):** volume realmente esboscato dalla particella da parte del soggetto richiedente l'esecuzione dell'intervento selvicolturale;
- **data** in cui è stato eseguito il taglio (gg:mm:aa).

Per omogeneizzare i dati inseriti alle specifiche **esigenze di calcolo** del modello WOCAS v2, sono state condotte le seguenti **elaborazioni preliminari**:

- suddivisione dati in base all'**anno di esecuzione del prelievo**, permettendo di correggere eventuali **errori relativi** a date non conformi. Per ciascuna particella, i volumi relativi ai prelievi effettuati nel medesimo anno sono stati successivamente **sommati** al fine di ottenere un valore annuo complessivo;
- tramite un **controllo incrociato** tra le date relative a ogni prelievo e le date di inizio del PAF vigente sulla particella, è risultato che: (i) **54 prelievi** sono stati effettuati nell'anno di entrata in vigore dei PAF, (ii) per **25 prelievi** la data di esecuzione non era disponibile e (iii) **762 prelievi** sono stati effettuati in anni precedenti l'entrata in vigore dei PAF (erano dunque relativi a PAF scaduti). A fronte di tali incongruenze questi ultimi prelievi sono stati esclusi dall'analisi; complessivamente sono stati quindi considerati **411 prelievi** su un totale di 1122 (**36,0%**).

In ultimo, sono stati **calcolati**:

- **volume cormometrico lordo prelevato totale (m³) per singola particella**, dato dalla somma del volume cormometrico lordo prelevato in ciascun anno analizzato⁴⁰;
- **Numero di prelievi effettuati per singola particella.**

⁴⁰

In base ai criteri di GFS, il volume effettivamente prelevato non dovrebbe mai superare quello prescritto, a meno che risulti necessario intervenire con tagli fitosanitari a seguito di danni da parte di agenti biotici (a esempio attacchi di insetti) o abiotici (a esempio incendi, schianti da vento, valanghe), oppure nel caso in cui, per specifiche esigenze di programmazione e in condizioni di mercato particolarmente favorevole, si preveda un utilizzo intensivo della risorsa legnosa.

Tabella 3.2 - Schematizzazione della struttura del Database Scheda Rilievo. Mediante la selezione a inizio record, i dati relativi alla particella selezionata sono riportati nell'estremità superiore del foglio di lavoro, nelle celle posizionate sopra le intestazioni "Dati assestamentali" e "Prelievi effettuati".

Dati assestamentali										Prelievi effettuati (m ³)				
										Anno				
Selezione (usare x)	N. record	Numero particella	Soggetto proprietario	...	Superficie totale lorda (ha)	...	Pendenza prevalente (°)	Provvigione totale fustaia (m ³)	...	2005	2006	2021
	1													
	2													
	3													
	4													
	5													
x	6													
	7													
	8													
	9													
	10													
	...													
	...													
	...													
	200													
	201													
	202													
	...													
	...													
	493													

3.2 Database “Scheda Risultati”

La seconda attività ha riguardato la predisposizione di un Database 2 (*output*) denominato “Scheda Risultati”, contenente le elaborazioni relative sia a **ciascun Comune**, sia all’intero territorio analizzato. Nel Database 2 ciascun record rappresenta un Comune, con 168 valori di *output* (campi). Complessivamente, dunque, tale Database è costituito 10 record x 168 campi = **1680 informazioni**. Come nel Database 1, anche il Database 2 permette, mediante **selezione a inizio record** (digitando una “x”) di visionare nell’estremità superiore del foglio di lavoro tutti i dati relativi al record selezionato (in questo caso il singolo Comune) (Tabella 3.3 e Figura 3.3). Le elaborazioni che sono state eseguite in questo Database sono:

- numero totale di particelle censite;
- superficie totale lorda (ha);
- superficie forestale in produzione (ha; % su totale lorda);
- superficie forestale non in produzione (ha; % su totale lorda);
- superficie produttiva non forestale (ha; % su totale lorda);
- superficie improduttiva (ha; % su totale lorda);
- provvigione totale (m^3 ; % sul totale);
- provvigione totale per specie legnosa prevalente (m^3 ; % su totale);
- incremento annuo lordo totale e per unità di superficie (m^3 ; $m^3 \cdot ha^{-1}$);
- tasso di incremento totale (rapporto tra incremento totale per unità di superficie e provvigione totale per unità di superficie; -);
- superficie lorda suddivisa per classe di accessibilità⁴¹ (ha; % su totale);
- numero di particelle e corrispondente superficie lorda per classe altitudinale (ha; % su superficie totale lorda);
- numero di particelle e corrispondente superficie lorda per classe di pendenza (ha; % su superficie totale lorda);
- prelievo lordo annuo prescritto totale ($m^3 \cdot anno^{-1}$; $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$);
- prelievo netto annuo prescritto totale ($m^3 \cdot anno^{-1}$; $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$);
- volume cormometrico lordo prelevato totale per singolo anno e complessivo per tutto il periodo analizzato (2005-2021; m^3).

Per calcolare il numero di particelle e la corrispondente superficie lorda in base all’altitudine sono state definite cinque classi in base all’**altitudine media (a_M ; m slm) della particella**:

- classe I: $0 \text{ m} \leq a_M < 500 \text{ m}$;
- classe II: $500 \text{ m} \leq a_M < 1000 \text{ m}$;

⁴¹ Già definite per ciascuna particella (cfr. paragrafo 3.1.1).

- classe III: $1000 \text{ m} \leq a_M < 1500 \text{ m}$;
- classe IV: $1500 \text{ m} \leq a_M < 2000 \text{ m}$;
- classe V: $2000 \text{ m} \leq a_M < 2500 \text{ m}$.

Per calcolare il numero di particelle e la corrispondente superficie lorda in base alla pendenza sono state definite sei classi in base alla **pendenza media (p_M ; %) della particella**:

- classe I: $0\% \leq p_M < 20\%$;
- classe II: $20\% \leq p_M < 40\%$;
- classe III: $40\% \leq p_M < 60\%$;
- classe IV: $60\% \leq p_M < 80\%$;
- classe V: $80\% \leq p_M < 100\%$;
- classe vi: $p_M \geq 100\%$.

Tabella 3.3 - Schematizzazione della struttura del Database Scheda Risultati. Mediante la selezione a inizio record, i dati relativi al Comune selezionato sono riportati nell'estremità superiore del foglio di lavoro, nelle celle posizionate sopra le intestazioni "Dati assestamentali" e "Prelievi effettuati".

Dati assestamentali									Prelievo effettuato (m ³)				
			Superficie (ha)						Anno				
Selezione (usare x)	Soggetto proprietario	Numero particelle	Totale lorda (ha)	...	Forestale in produzione (ha)	Improduttiva (ha)	Provvigione totale (m ³)	Pendenza prevalente (°)	2005	2006	2021
	Comune di Aprica												
	Comune di Grosio												
	...												
	...												
	...												
x	...												
	...												
	...												
	Comune di Sondalo												
	Comune di Valfurva												
	Totale												

Selezione ("x")	5		11		2.23%		301.7		234.3		6.3		77.65%		35934.0		80.79%		8543.0		19.21%		17334.0		14132.7		12275.8		0.0		167.8		105.7		28.2		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		417.0	
	Soggetto proprietario		Particelle		superficie (ha)		provvigione (volume cormometrico lordo)		Classi di accessibilità (ha)																																							
	Numero	Nome	Numero (-)	% su totale territorio	totale lorda rilevata (ha)	forestale di riferimento (ha)	improduttiva (ha)	superficie forestale % superficie lorda (-)	fustaia (m ³)				Per specie legnosa prevalente (m ³)				Classe I	Classe II	Classe III																													
									volume cavallettato	% su totale PAF	volume stimato	% su totale PAF	Picea abies L.	Larix decidua Mill.	Pinus cembra L.	Abies alba Mill.				2005	2006	2007	2008	2009	2010																							
	1	COMUNE DI APRICA	24	4.87%	635.4	571.6	35.0	89.96%	48137.0	50.71%	46788.0	49.29%	62089.4	30662.8	0.0	0.0	274.4	125.0	236.0	0.0	0.0	724.3	0.0	0.0	0.0	0.0	108.0																					
	2	COMUNE DI GROSIO	139	28.19%	3247.9	2807.9	276.3	86.45%	233110.0	56.95%	176222.0	43.05%	247827.0	104460.0	19531.0	0.0	1553.0	1239.8	450.6	0.0	194.6	833.9	1674.3	283.8	510.0																							
	3	COMUNE DI GROSOTTO	36	7.30%	1251.3	1146.9	33.6	91.66%	197677.0	88.77%	24997.0	11.23%	141715.3	68527.3	8903.0	25.2	638.3	569.5	52.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																							
	4	COMUNE DI LOVERO	9	1.83%	211.8	158.5	9.1	74.81%	28186.5	74.96%	9414.7	25.04%	19847.9	10169.4	878.0	5327.4	144.1	67.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	626.4	0.0																							
x	5	COMUNE DI MAZZO DI VALTELLINA	11	2.23%	301.7	234.3	6.3	77.65%	35934.0	80.79%	8543.0	19.21%	17334.0	14132.7	12275.8	0.0	167.8	105.7	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	417.0																							
	6	COMUNE DI TOVO S. AGATA	5	1.01%	156.6	83.9	4.2	53.60%	4789.0	43.70%	6170.0	56.30%	2578.0	7173.2	1154.3	0.0	127.7	25.8	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0																							
	7	COMUNE DI VERVIO	5	1.01%	113.6	83.1	4.8	73.18%	10796.2	66.77%	5374.1	33.23%	7844.0	7120.8	0.0	0.0	73.1	39.2	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																							
	8	COMUNE DI VALDIDENTRO	135	27.38%	3837.8	2038.7	556.3	53.12%	307445.0	64.42%	169832.0	35.58%	296984.0	81599.0	83497.0	0.0	2181.2	1450.5	206.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																							
	9	COMUNE DI SONDALO	66	13.39%	3114.0	2112.8	463.3	67.85%	186385.0	52.79%	166676.0	47.21%	259246.0	73805.0	3141.0	0.0	785.5	1099.4	1229.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																							
	10	COMUNE DI VALFURVA	63	12.78%	2428.6	1305.2	650.8	53.74%	331017.0	86.81%	50279.0	13.19%	217535.0	57637.0	105602.0	0.0	1467.2	798.7	162.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																							

Figura 3.3- Porzione del Database Scheda Risultati. Per motivi di spazio non è possibile includere l'intero Database in una singola figura.

3.3 Quantificazione delle masse di legno e C: il modello Woody Biomass and Carbon ASsessment

3.3.1 Struttura generale

La terza attività ha riguardato l'inserimento dei dati di *input* del Database 1 nel modello di calcolo *WOody Biomass and Carbon Assessment* (WOCAS v2), elaborato da UniMi-DiSAA per quantificare - secondo le Linee Guida dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* - le masse di legno ($t \cdot anno^{-1}$ SS) e C ($t \cdot anno^{-1}$ C) per ciascuna particella forestale dall'anno di entrata in vigore del PAF fino a un anno di riferimento. Nel presente studio, le masse di legno e C sono calcolate per il periodo 2005-2021.

Il modello è stato realizzato mediante MS Office Excel 365[®] ed è composto da due fogli di lavoro: (i) **selezione parametri** e (ii) **calcolo delle masse di legno e C**.

Il primo foglio contiene una tabella in cui ciascuna delle *j*-esime particelle è classificata in base ai seguenti **sotto-criteri (SC)**: SC1: struttura; SC2: funzione prevalente, SC3: tipologia forestale.

A ciascun sotto-criterio è associato un sottocodice, e la combinazione di tali sottocodici genera un **Codice Univoco di Classificazione (CUC)**, a cui sono associati **parametri di calcolo** specifici che vengono caricati nel secondo foglio di lavoro (**Figura 3.4**).

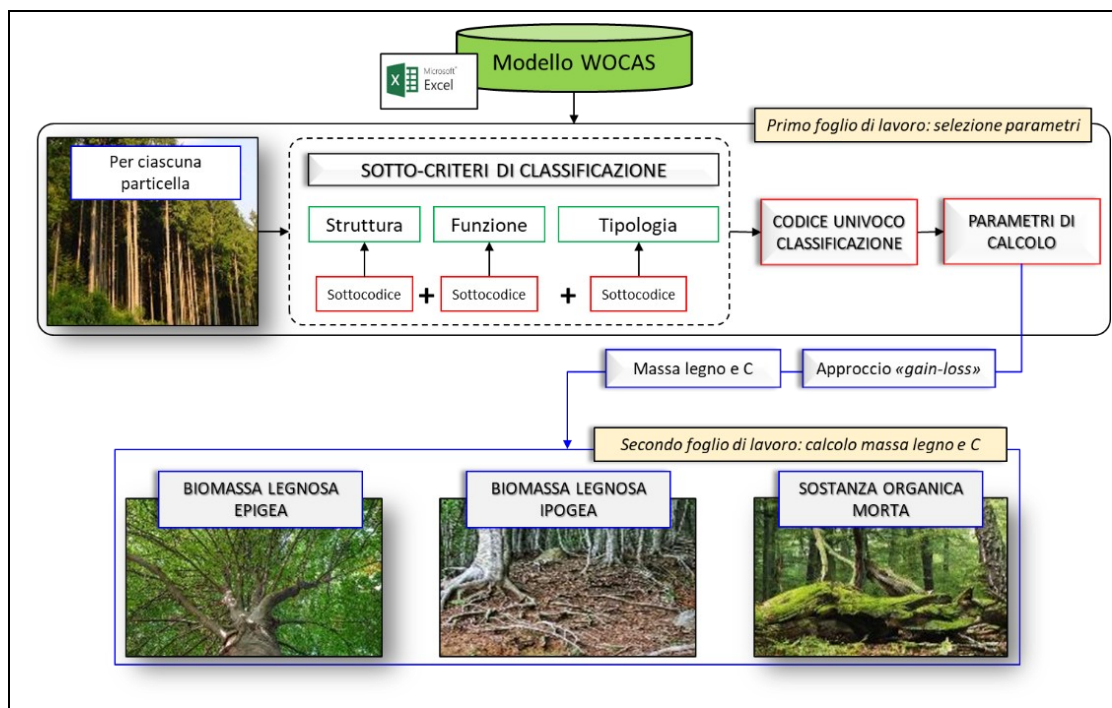


Figura 3.4- Schema logico generale per la definizione dei parametri di calcolo associati a ciascun CUC (Fonte: modificato da Nonini e Fiala, 2022).

Il secondo foglio di lavoro è costituito da un **Database** in cui ogni particella rappresenta un record, organizzato in differenti campi contenenti specifici dati di input e i corrispondenti risultati di output, secondo una **struttura modulare**.

Sono inoltre presenti dei **campi di controllo** che danno la possibilità, mediante una **selezione a inizio record**, di azzerare tutti i campi relativi a una specifica particella al fine di escludere quest'ultima dall'analisi. Ciò rende il modello molto **flessibile**, consentendo una **modulazione** e la possibilità di effettuare l'analisi esclusivamente su alcune particelle.

La **Figura 3.5** mostra l'approccio generale per la quantificazione delle masse di legno e C a livello particellare.

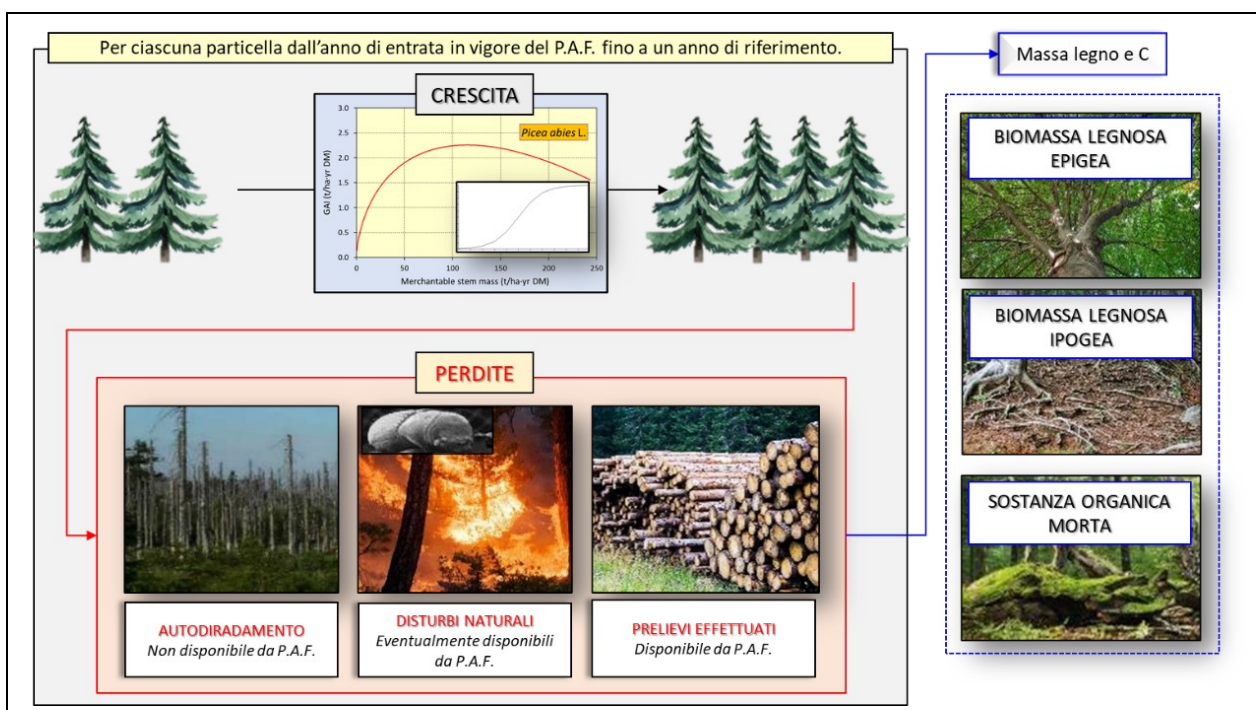


Figura 3.5- Approccio generale per la quantificazione della massa annua di legno e C a scala particellare (Fonte: modificato da Nonini e Fiala, 2022).

Per ciascuna particella e in ciascun anno analizzato, le masse sono ripartite nei seguenti **comparti ecosistemici** (Tabella 3.4): (i) **biomassa legnosa epigea**, (ii) **biomassa legnosa ipogea** e (iii) **sostanza organica morta** (legno morto e lettiera)⁴².

⁴²

Contestualmente, il modello quantifica anche la biomassa residuale (ramaglia e cimoli, t-anno⁻¹ SS) potenzialmente prelevabile da ciascuna particella e potenzialmente disponibile - sottoforma di cippato - per la generazione di energia termica e/o elettrica in impianti centralizzati di teleriscaldamento-cogenerazione. Partendo da tali risultati, il modello calcola anche il volume di combustibile fossile potenzialmente risparmiabile e le emissioni di CO₂ in atmosfera potenzialmente evitabili associate alla fase di combustione finale, nell'ipotesi che il legno sostituisca fonti energetiche fossili.

Tabella 3.4 - Comparti ecosistemici considerati dal modello.

N.	Nome	Definizione
1	Biomassa legnosa epigea	Fusto, rami e cimiali con corteccia (foglie escluse) relativi a tutti gli alberi vivi presenti nel soprassuolo.
2	Biomassa legnosa ipogea	Biomassa di radici vive grosse ($\varnothing \geq 0,2$ cm). Le radici fini (diametro $\varnothing < 0,2$ cm) sono incluse nel suolo o nella lettiera in quanto non possono essere distinte empiricamente da essi.
3	Sostanza organica morta	Legno morto (biomassa morta non contenuta nella lettiera, sia in piedi sia sulla superficie del terreno, con $\varnothing \geq 10$ cm) e lettiera (biomassa non vivente con diametro $\varnothing < 10$ cm); include materiale in differenti stadi di decomposizione e radici fini).

Prima di eseguire i calcoli, tutti i dati di volume sono convertiti in **massa** mediante il parametro k_1 (**densità basale**, $t \cdot m^{-3}$ SS). Tale parametro esprime il rapporto tra la **sostanza secca del legno** (tenore idrico $U = 0\%$) e il suo **volume allo stato fresco** (Vitullo e Federici, 2007). Massa e volume non sono misurati contemporaneamente (e quindi nella stessa condizione di tenore idrico), ma in due istanti diversi; più precisamente quando la massa è minima e il volume è massimo. In tal senso, la densità basale prescinde pertanto dal “ritiro” del legno e varia principalmente in base a: (i) condizioni ecologico-ambientali, (ii) specie, (iii) età degli alberi e (iv) componenti del medesimo albero (a esempio fusto e rami).

Nell’Elaborato sono stati impiegati i valori di densità basale riportati in Federici et al. (2008), validi per le principali specie forestali italiane. Per ciascuna specie, i valori sono assunti costanti per tutte le componenti della pianta (fusto, rami, radici).

3.3.2 Approccio metodologico

3.3.2.1 Incremento annuo lordo

Per ciascuna delle j -esime particelle, WOCAS v2 calcola, innanzitutto, la massa cormometrica lorda alla fine dell’anno “ n ” partendo dalla massa cormometrica lorda alla fine dell’anno “ $n-1$ ”, aggiungendo l’**incremento annuo lordo**, e sottraendo le **perdite** dovute a: (i) **mortalità causata da auto-diradamento** e competizione per luce, acqua ed elementi nutritivi, (ii) **disturbi naturali** (incendi, schianti da vento, attacchi parassitari, altro) e (iii) prelievi.

Come accennato in precedenza, nei PAF la crescita annua è espressa mediante un **incremento lordo** che, per definizione, include l’incremento di volume sia degli alberi vivi, sia degli alberi che moriranno nel periodo di riferimento, a causa di auto-diradamento, disturbi naturali e prelievi. Tale incremento, inoltre, è assunto costante nel tempo; ciò rappresenta una **semplificazione** in quanto esso varia in base a massa/volume cormometrica/o, età, condizioni ecologico-ambientali e modalità di gestione (Federici et al., 2008; Tulipano, 2008).

Per superare tale **limitazione**, i calcoli sono eseguiti applicando la **derivata prima della funzione di Richards**, che lega direttamente l’incremento annuo lordo alla massa cormometrica

presente all'inizio dell'anno, **senza considerare l'età**⁴³. La funzione di Richards è espressa da una equazione di **regressione non lineare** con andamento **sigmoidale** nella seguente forma (Federici et al., 2008; Tulipano, 2008):

$$P_{n(j)} = k_2 \cdot [1 - e^{(k_3 - k_4 \cdot t)}]^{-1/k_5} \quad (\text{Eq. 1})$$

Dove:

$P_{n(j)}$: massa cormometrica lorda unitaria della particella all'inizio dell'anno "n" ($t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

k_2 : massa cormometrica lorda massima della particella (capacità portante, o valore asintotico; $t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ SS; $k_{1(j)} > 0$);

e: numero di Eulero (costante pari a 2,718);

k_3 : parametro di crescita che permette di variare l'istante in cui la massa cormometrica è pari alla metà del suo valore massimo (adimensionale);

k_4 : tasso di crescita relativo (tasso accumulo di SS per unità di SS esistente; anni^{-1} ; $k_{3(j)} > 0$);

t: tempo (anni);

k_5 : parametro di forma che permette al punto di flesso di essere a qualsiasi valore della massa cormometrica compreso tra il minimo e il massimo (adimensionale; $-1 \leq k_{5(j)} \leq +\infty$; $k_{5(j)} \neq 0$);

La **derivata prima** è espressa nella seguente forma (Federici et al., 2008; Tulipano, 2008):

$$IAL_{n(j)} = \left[\frac{k_4}{k_5} \cdot P_{n(j)} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{n(j)}}{k_1(j)} \right)^{k_5} \right] + k_6 \right] \cdot A_j \quad (\text{Eq. 2})$$

Dove:

$IAL_{n(j)}$: incremento annuo lordo della particella ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

k_6 : incremento lordo della particella a massa nulla (incremento dall'anno 0 all'anno 1; $t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ SS). Questo parametro non deriva dal calcolo della derivata prima ma è richiesto per definire un punto di inizio della funzione;

A_j : superficie forestale della particella (ha).

⁴³ Tale funzione è utilizzata anche a livello regionale per la predisposizione del NIR relativo all'inventario delle emissioni e degli assorbimenti di gas serra in accordo con UNFCCC, il protocollo di Kyoto e il Meccanismo di Monitoraggio dei Gas Serra dell'Unione Europea.

In base alla funzione di Richards, l'incremento lordo di un determinato anno dipende direttamente dalla massa cormometrica presente all'inizio di quell'anno. L'incremento aumenta all'aumentare della massa con andamento prima esponenziale, poi lineare e raggiungendo un massimo in corrispondenza del punto di flesso della funzione, e infine diminuisce fino ad azzerarsi in corrispondenza della massa massima. La funzione di Richards rappresenta una **generalizzazione della curva di crescita logistica classica** (in grado di descrivere solo "pattern" di crescita simmetrici, in cui cioè l'incremento massimo si raggiunge quando la massa effettivamente presente all'interno della particella è esattamente la metà del valore massimo) e di altre funzioni analoghe (a esempio: esponenziale, Bertalanffy e Gompertz), perché permette di descrivere anche "pattern" di crescita asimmetrici, in cui cioè l'incremento massimo si può raggiungere in corrispondenza di qualsiasi valore della massa cormometrica compreso tra 0 e il valore massimo. Tale funzione esprime, in termini biologici, la **fotosintesi netta**, cioè la differenza tra i **processi anabolici** (fotosintesi lorda) e quelli **catabolici** (respirazione cellulare) (Tulipano, 2008).

La **Figura 3.6** mostra l'andamento dell'incremento annuo lordo in funzione della massa cormometrica lorda per: (i) *Picea abies* L., (ii) *Abies alba* Mill., (iii) *Larix decidua* Mill., (iv) *Fagus sylvatica* L. (forma di governo: fustaia), (v) *Castanea Sativa* Mill. (forma di governo: ceduo) e (vi) *Quercus cerris* L. (forma di governo: fustaia), calcolato impiegando specifici **parametri di crescita** derivanti da letteratura e **calibrati per la Regione Lombardia** sulla base dei dati contenuti nelle tavole allometriche regionali, mentre la **Figura 3.6** mostra, per le suddette specie, l'andamento della massa cormometrica lorda nel tempo. Il valore di ciascun parametro della funzione e disponibile in letteratura è stato stimato come **media aritmetica** dei valori ottenuti da tutte le **classi di produttività**, non eseguendo alcuna ponderazione per tenere conto del differente contributo di specifiche classi rispetto ad altre (Tulipano, 2008).

Nell'Elaborato sono stati impiegati i valori specifici dei parametri della funzione di Richards **calibrati per la Regione Lombardia** (Vitullo e Federici; 2018).

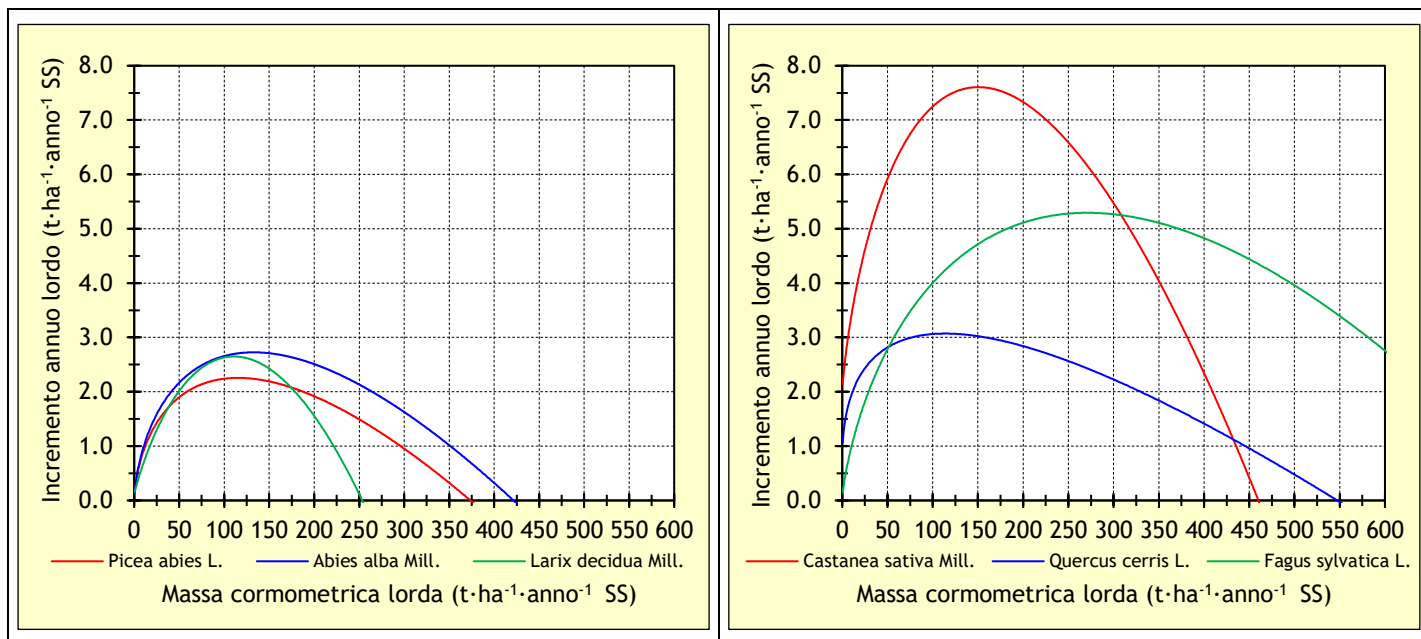


Figura 3.6 - Andamento dell'incremento annuo lordo in funzione della massa cormometrica lorda per: (i) *Picea abies* L., (ii) *Abies alba* Mill., (iii) *Larix decidua* Mill., (iv) *Fagus sylvatica* L. (forma di governo: fustaia), (v) *Castanea Sativa* Mill. (forma di governo: ceduo) e (vi) *Quercus cerris* L. (forma di governo: fustaia), calcolato impiegando parametri di crescita specifici derivanti dalla letteratura calibrati per la Regione Lombardia (Fonte: Nonini e Fiala, 2022).

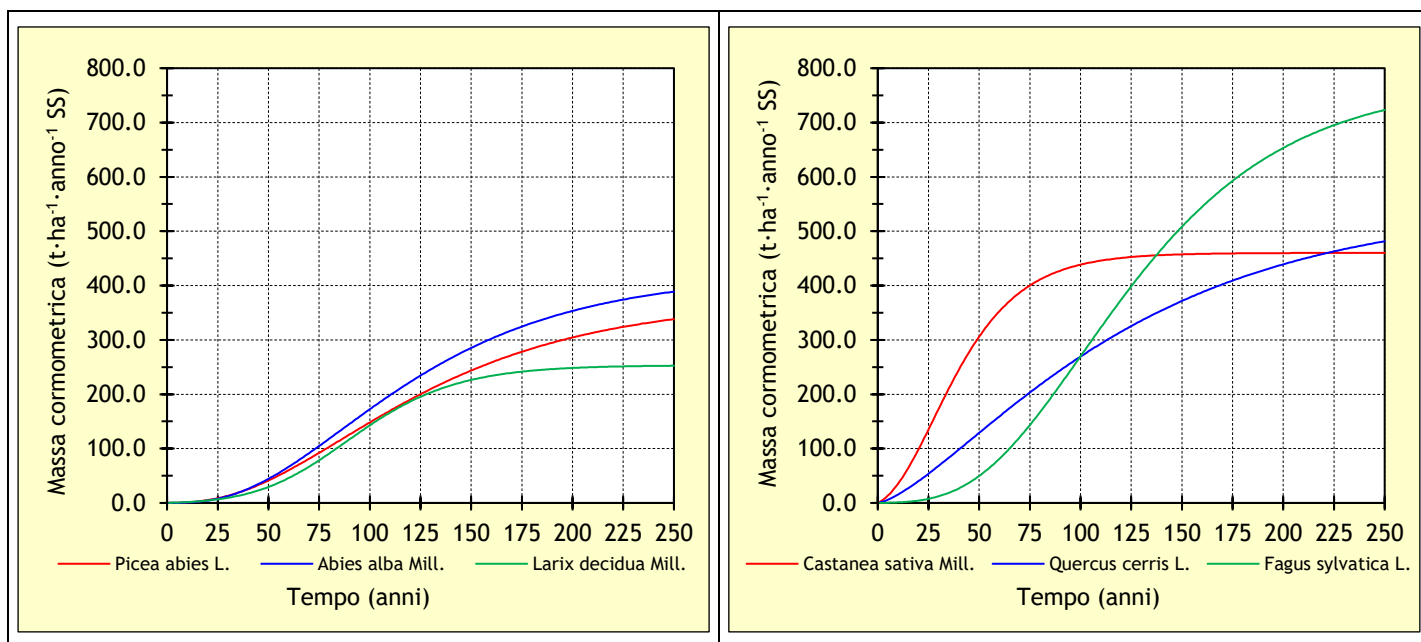


Figura 3.7 - Andamento della provvigione lorda nel tempo per: (i) *Picea abies* L., (ii) *Abies alba* Mill., (iii) *Larix decidua* Mill., (iv) *Fagus sylvatica* L. (forma di governo: fustaia), (v) *Castanea Sativa* Mill. (forma di governo: ceduo) e (vi) *Quercus cerris* L. (forma di governo: fustaia) (Fonte: Nonini e Fiala, 2022).

Una volta stimato l'incremento annuo lordo, WOCAS v2 quantifica l'incremento netto e, successivamente, la biomassa legnosa epigea e ipogea alla fine di ciascun anno "n".

3.3.2.2 Incremento annuo netto

L'**incremento annuo netto** ($IAN_{n(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è calcolato sottraendo all'incremento annuo lordo ($IAL_{n(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) la massa cormometrica persa per mortalità causata da: (i) **auto-diradamento e competizione** ($MC_{An(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) e (ii) **disturbi naturali** ($MC_{Dn(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS):

$$IAN_{n(j)} = IAL_{n(j)} - MC_{An(j)} - MC_{Dn(j)} \quad (\text{Eq. 3})$$

In particelle naturali caratterizzate da prelievi periodici, $P_{MAAn(j)}$ può raggiungere il **30-50% di $IAN_{n(j)}$** , mentre in particelle regolarmente gestite $MC_{An(j)}$ può essere addirittura trascurabile perché i prelievi selvicolturali rimuovono tale massa che, altrimenti, sarebbe trasferita alla sostanza organica morta (IPCC, 2006). Se espresso come frazione della **massa cormometrica**, $MC_{An(j)}$ può raggiungere l'**1,2%** della massa stessa (Harmon et al., 2001; IPCC, 2006). Per incrementare la **flessibilità del modello**, l'utente deve definire, per ciascun CUC, se esprimere $MC_{An(j)}$ come una frazione (costante nel tempo) dell'incremento annuo lordo (0-50%) o, alternativamente, della massa cormometrica (0-1,2%). In entrambi i casi, è possibile scegliere se impiegare un **valore medio** oppure un valore compreso tra il **minimo** e il **massimo** definito dal modello.

Nell'Elaborato è stato impiegato un valore di $P_{MAAn(j)}$ pari al **10% di $IAL_{n(j)}$** (Magnani e Raddi, 2014; Nonini e Fiala, 2022).

Le informazioni relative ai **disturbi naturali** (anno di accadimento, tipologia e volume di cormometrico lordo colpito) devono essere inserite dall'utente. Il volume colpito è poi convertito in massa attraverso il parametro k_1 . Successivamente, WOCAS v2 quantifica la frazione di biomassa legnosa epigea trasferita alla sostanza organica morta in base alla **tipologia di disturbo** (incendio; schianto da vento; attacco di agenti parassiti/patogeni; valanga; altro) (Nonini e Fiala, 2022).

Nell'Elaborato, l'**unico disturbo naturale** preso in considerazione è stata la **tempesta Vaia**; informazioni relative ad altre tipologie di disturbo (aree colpite e corrispondente volume interessato) non erano infatti disponibili né dai PAF, né dalle istanze di taglio. Per quantificare la massa cormometrica colpita (dato non disponibile né dai PAF, né dalle istanze di taglio) è stata preliminarmente effettuata una analisi con il **software QGIS 3.24[®]**: partendo da dati disponibili nel **Geoportale di Regione Lombardia⁴⁴** relativi alle aree colpite dal disturbo, è stata definita, per ciascuna particella censita, la **superficie forestale (ha) colpita** e, quindi,

⁴⁴ <https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>

proporzionalmente al valore di massa cormometrica presente nella particella nel 2018, il **volume cormometrico lordo (m³) interessato dal disturbo** e schiantato a terra⁴⁵.

3.3.2.3 Massa cormometrica lorda prelevata e biomassa residuale potenzialmente producibile

L'inserimento dei dati relativi a (i) codice identificativo della tipologia di prelievo, (ii) descrizione del taglio e (iii) uso civico (sì/no) avviene mediante **menu a tendina**, mentre il valore di volume cormometrico lordo prelevato ($VC_{Pn(j)}$; $m^3 \cdot \text{anno}^{-1}$) deve essere digitato⁴⁶. Per ciascuna particella e per ciascun anno di esecuzione del prelievo, la **massa cormometrica lorda prelevata** ($MC_{Pn(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) (**Figura 3.8 - sinistra**) è calcolata in base al volume cormometrico lordo prelevato e al parametro k_1 ($t \cdot m^{-3}$ SS) (Nonini e Fiala, 2022).

Contestualmente, il modello quantifica la **biomassa residuale potenzialmente producibile** da interventi selvicolturali, che include tutta la biomassa lasciata sul terreno dopo il prelievo del fusto, cioè **rami, cimati, ceppaia, porzioni di fusto di piccole dimensioni o con difetti fisico-strutturali** tali da non essere commercializzabili (IPCC, 2006; EN ISO 16559; Teobaldelli et al., 2009; Thiffault et al., 2014) (**Figura 3.8 - destra**).

Dal momento che i PAF forniscono solamente informazioni sul volume cormometrico lordo, l'eventuale **biomassa residuale** è oggetto di **stima**. Nel modello la biomassa residuale potenzialmente producibile ($RP_{n(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) fa riferimento esclusivamente a rami e cimati ed è quantificata come (IPCC, 2006):

$$RP_{n(j)} = (MC_{Pn(j)} \cdot k_7) - MC_{Pn(j)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Dove k_7 (adimensionale) è il fattore di espansione della biomassa (rapporto tra massa epigea legnosa totale e massa cormometrica).

I **fattori di espansione della biomassa** sono impiegati per “espandere” il volume cormometrico in volume dendrometrico, cioè relativo a tutta la biomassa legnosa epigea, in modo tale da includere anche le porzioni non commercializzabili (IPCC, 2006; Teobaldelli et al., 2009). Nell'ipotesi che k_7 sia il medesimo per tutte le componenti legnose della pianta, k_7 può anche essere utilizzato per “espandere” la massa cormometrica in **massa dendrometrica**.

⁴⁵ Come per gli altri dati di input, anche tale valore, prima di essere impiegato nel conteggio, è convertito dal modello in t SS impiegando il parametro k_1 (densità basale).

⁴⁶ L'analisi storica dei prelievi effettuati è fondamentale per analizzare come è stata utilizzata la risorsa locale nel corso del tempo e valutare la sua disponibilità, sia attuale, sia futura. Spesso le analisi della disponibilità di biomassa sono condotte solo sulla base degli interventi selvicolturali pianificati (prelievi prescritti), che non sempre corrispondono a quelli effettuati.



Figura 3.8 - Massa cormometrica prelevata e accumulata a bordo strada (sinistra) (Fonte: www.trentinotreeagreement.it) e biomassa residuale (destra) (Fonte: www.dipiazzapiergio.org.it).

3.4.2.4 Biomassa legnosa epigea e ipogea

La massa cormometrica lorda alla fine dell'anno "n" ($MC_{n(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è quantificata come:

$$MC_{n(j)} = MC_{n-1(j)} + IAN_{n(j)} - MC_{Pn(j)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Dove $MC_{n-1(j)}$ ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è la massa cormometrica alla fine dell'anno n-1. La biomassa legnosa epigea ($B_{EPIn(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) e ipogea ($B_{IPOn(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) alla fine dell'anno "n" (**Figura 3.9**) sono calcolate rispettivamente come:

$$B_{EPIn(j)} = MC_{n(j)} \cdot k_7 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$B_{IPOn(j)} = MC_{n(j)} \cdot k_8 \quad (\text{Eq. 7})$$

Dove k_8 (adimensionale) esprime il rapporto massa di sostanza secca delle radici grosse e la massa cormometrica lorda (IPCC, 2006).

Nell'Elaborato sono stati impiegati valori specifici di k_8 definiti per le principali specie forestali italiane (Federici et al. 2008).

La massa legnosa totale ($B_{TOTn(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è dunque calcolata come:

$$B_{TOTn(j)} = B_{EPIn(j)} + B_{IPOn(j)} \quad (\text{Eq. 8})$$



Figura 3.9 - Biomassa legnosa epigea (sinistra) e ipogea (destra) (Fonte: www.pixabay.com).

3.3.2.5 Sostanza organica morta

La sostanza organica morta (Figura 3.10) alla fine dell'anno "n" è quantificata applicando un bilancio di massa in base a input e output annuali:

$$SOM_{n(j)} = SOM_{n-1(j)} + SOM_{INn(j)} - SOM_{OUTn(j)} \quad (\text{Eq. 9})$$

Dove:

$SOM_{n(j)}$: massa di legno nella sostanza organica morta alla fine dell'anno n ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$SOM_{n-1(j)}$: massa di legno nella sostanza organica morta alla fine dell'anno n-1 ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$SOM_{INn(j)}$: input di sostanza organica morta nell'anno n ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$SOM_{OUTn(j)}$: output di sostanza organica morta nell'anno n ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

Solo per il primo anno della simulazione (anno di entrata in vigore del PAF), la massa iniziale di legno nella sostanza organica morta ($SOM_{YRS(j)}$; $t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è calcolata come:

$$SOM_{ST(j)} = MC_{ST(j)} \cdot k_7 \cdot k_9 \quad (\text{Eq. 10})$$

Dove:

$MC_{ST(j)}$: massa cormometrica lorda presente all'anno di entrata in vigore del PAF ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

k_9 : fattore di espansione della sostanza organica morta (adimensionale; rapporto tra la massa secca di sostanza organica morta e la biomassa legnosa epigea).

$SOM_{INn(j)}$ ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) è:

$$DOM_{INn(j)} = (MC_{An(j)} \cdot k_7) + (MC_{An(j)} \cdot k_8) + (MC_{Dn(j)} \cdot k_7 \cdot k_{10}) + (MC_{Dn(j)} \cdot k_8) + RP_{n(j)} + (MC_{Pn(j)} \cdot k_8) \quad (\text{Eq. 11})$$

Dove:

$MC_{An(j)} \cdot k_7$: biomassa legnosa epigea derivante da auto-diradamento ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$MC_{An(j)} \cdot k_8$: biomassa legnosa ipogea derivante da auto-diradamento ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$MC_{Dn(j)} \cdot k_7 \cdot k_{10}$: biomassa legnosa epigea derivante da disturbi naturali ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS); k_{10} (adimensionale) è la **frazione di biomassa epigea trasferita** alla sostanza organica morta in base alla **tipologia di disturbo**. Per incendio è impiegato un valore di $k_{10} = 0,5$ (Regione Piemonte, 2010) nell'assunzione che il 50% della biomassa epigea colpita sia trasferita, e la frazione restante sia persa in atmosfera. Per tutti gli altri disturbi, $k_{10} = 1,0$, cioè è assunto che il 100% della biomassa colpita sia trasferita.

$MC_{Dn(j)} \cdot k_8$: biomassa legnosa ipogea derivante da disturbi naturali ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$RP_{n(j)}$: biomassa residuale potenzialmente producibile ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS);

$MC_{Pn(j)} \cdot k_8$: biomassa legnosa ipogea potenzialmente producibile ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS).

$SOM_{OUTn(j)}$ ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ DM) si riferisce alla decomposizione, ed è quantificata come:

$$SOM_{OUTn(j)} = (SOM_{n-1(j)} + SOM_{INn(j)}) \cdot k_{11} \quad (\text{Eq. 12})$$

Dove k_{11} è il tasso annuo di decomposizione (adimensionale).



Figura 3.10 - Sinistra: sostanza organica morta in piedi (sinistra) e a terra (destra) Fonte: www.pixabay.com.

Nell'Elaborato, la massa di legno nella sostanza organica morta all'inizio della simulazione è stata quantificata applicando un valore di $k_9 = 0,25$ e $k_9 = 0,15$ rispettivamente per conifere e latifoglie, mentre la decomposizione è stata simulata applicando un valore di $k_{11} = 0,0032$ per conifere e $k_{11} = 0,0080$ per latifoglie (Nonini e Fiala, 2022). La **Figura 3.11** mostra lo schema logico implementato all'interno del modello WOCAS v2 per la quantificazione della massa di legno nella sostanza organica morta.

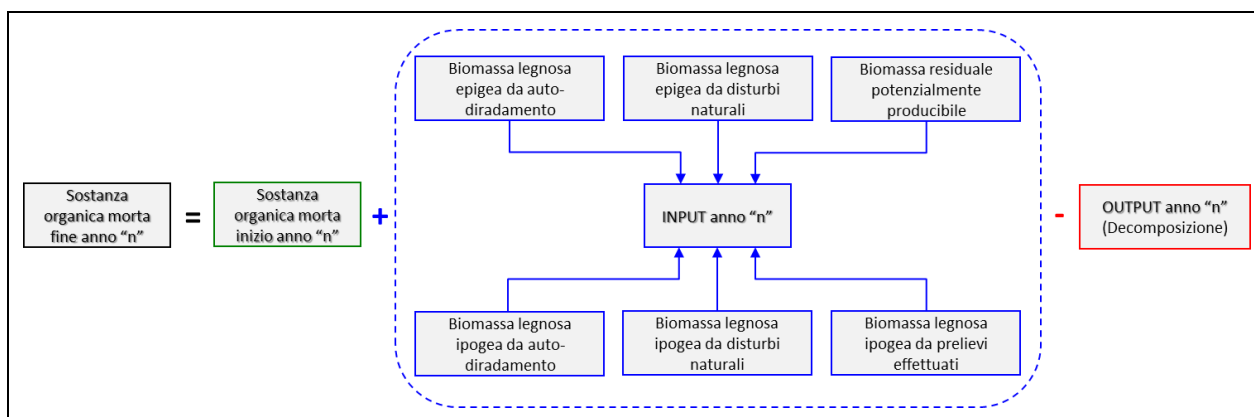


Figura 3.11 - Schema logico del modello WOCAS v2 per la quantificazione della sostanza organica morta.

Per una maggiore **flessibilità operativa**, la **biomassa residuale potenzialmente producibile** può essere calcolata impiegando, alternativamente, valori di k_7 definiti per: (i) per ciascun CUC con cui ogni particella è classificata; (ii) ciascuna particella in base alla massa cormometrica lorda presente all'anno di entrata in vigore del PAF. In entrambi i casi, il valore di k_7 è definito all'**inizio della simulazione** ed è assunto **costante nel tempo**. Per calcolare il valore di k_7 per singola particella, WOCAS v2 impiega una **funzione di regressione non lineare** (Teobaldelli et al., 2009):

$$k_{7(j)} = k_{12} + (k_{13}/MC_{IN(j)}) \quad (\text{Eq. 13})$$

Dove:

$MC_{IN(j)}$: massa cormometrica lorda unitaria all'anno di entrata in vigore del PAF ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$ SS);
 k_{12} , k_{13} : parametri della funzione di regressione non lineare definiti per ciascun CUC (k_9 : adimensionale; k_{10} : $t \cdot ha^{-1}$ SS).

Il parametro k_7 , infatti, esprimendo la **tendenza della pianta alla ramificazione**, non è costante ma varia in base a produttività, condizioni ambientali, modalità di gestione, specie, età e

dimensione (volume o massa) delle piante stesse (Levy et al., 2004; Wirth et al., 2004; IPCC, 2006; Teobaldelli et al., 2009).

Nell'Elaborato, per ciascuna particella, sono stati analizzati **due Scenari (S1 e S2)** in base al valore assunto dal **parametro k_7** :

- **Scenario 1:** valori **medi e costanti** per ciascun CUC (Federici et al., 2008);
- **Scenario 2:** valori **calcolati** per ciascuna **particella** (Teobaldelli et al.; 2009).

3.3.2.6 Massa di Carbonio

La massa di carbonio in: $B_{EPIn(j)}$, $B_{IPOn(j)}$ e $SOM_{n(j)}$ ($CB_{EPIn(j)}$, $CB_{IPOn(j)}$ e $CSOM_{n(j)}$, rispettivamente; $t \cdot anno^{-1} C$) è quantificata come:

$$CB_{EPIn(j)} = B_{EPIn(j)} \cdot k_{14} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$CB_{IPOn(j)} = B_{IPOn(j)} \cdot k_{15} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$CSOM_{n(j)} = SOM_{n(j)} \cdot k_{16} \quad (\text{Eq. 16})$$

Dove k_{14} , k_{15} e k_{16} sono le **frazioni di C** in B_{EPI} , B_{IPO} e SOM ($t C \cdot t SS^{-1}$). Nell'Elaborato sono stati impiegati specifici valori di k_{14} , k_{15} e k_{16} per ciascun CUC in base alla specie (Thomas e Martin, 2012). In caso di mancanza di valori specifici, è stato assunto un valore di $k_{14} = 0,508$ e $k_{14} = 0,477$ per conifere e latifoglie, rispettivamente. È stato inoltre assunto che $k_{14} = k_{15} = k_{16}$.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Dati assestamentali

4.1.1 Superficie

A livello territoriale, la **superficie forestale totale** (10542,9 ha) è pari al 68,9% della **superficie totale lorda** (15298,7 ha). La superficie restante (4755,8 ha; 31,1%) si suddivide in: (i) **improduttiva** (2039,9 ha; 13,3%), (ii) **produttiva non forestale** (462,7 ha; 3,0%), e (iii) **forestale non produttiva** (2253,9 ha; 14,7%).

Il Comune con la **maggiore superficie forestale** (2807,9 ha; 26,6% della **superficie forestale totale**) è **Grosio**, seguito da **Sondalo** (2112,8 ha; 20,0%) e **Valdidentro** (2038,8 ha; 19,3%). Il Comune di **Grosotto** è quello con il **più elevato rapporto tra superficie forestale e superficie lorda** (91,6%), seguito da **Aprica** (90,0%) e **Grosio** (86,5%). Il Comune con il rapporto più basso, invece, è **Valdidentro** (53,1%), seguito da **Tovo S. Agata** (53,6%) e **Valfurva** (53,7%). Valdidentro è il Comune con la **maggiore superficie forestale non in produzione** (1243,3 ha; 32,4% della superficie lorda del PAF). Il Comune con la **superficie produttiva non forestale più elevata** (163,7 ha; 5,0% della superficie lorda del PAF) è **Grosio**. I tre Comuni della **Comunità Montana Alta Valtellina** sono caratterizzati dalla **superficie improduttiva più elevata**, secondo il seguente ordine: (i) **Valfurva** (650,8 ha; 26,8% della superficie lorda del PAF), (ii) **Valdidentro** (556,3 ha; 14,5%), e (iii) **Sondalo** (462,3 ha; 14,9%) (**Figura 4.1**).

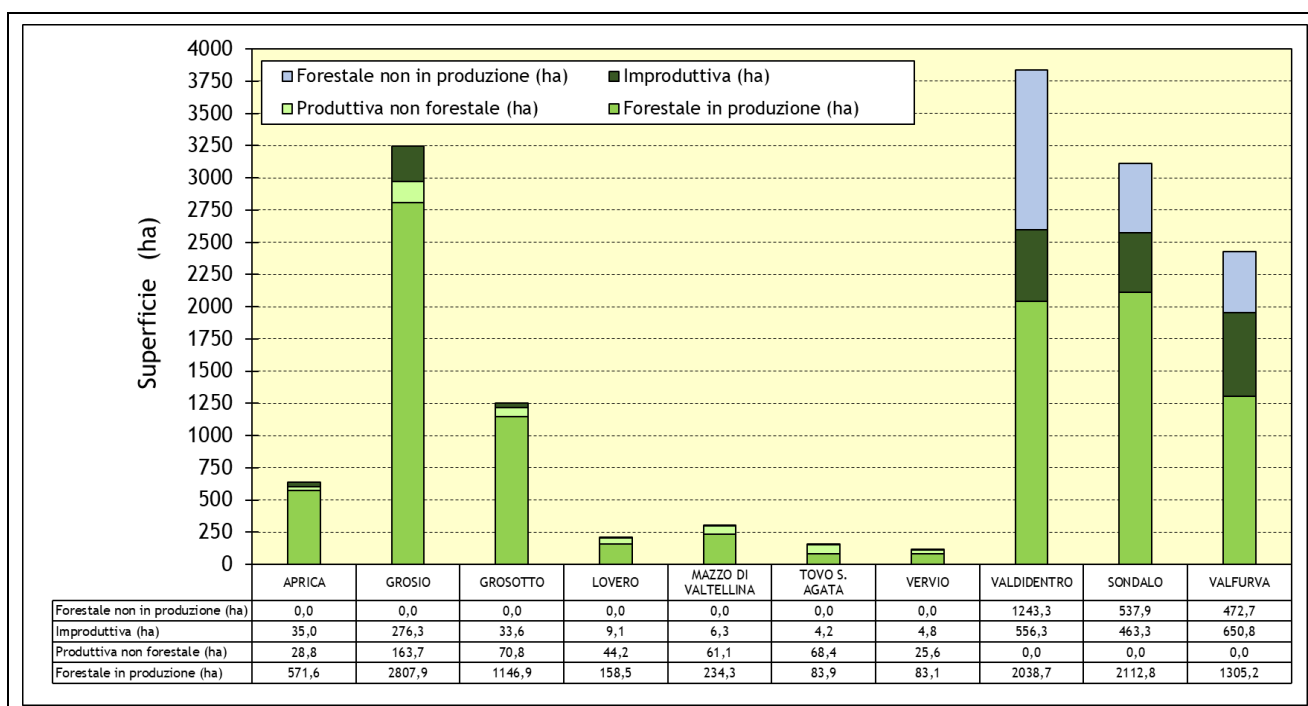


Figura 4.1 - Ripartizione della superficie per ciascun PAF analizzato.

La **Tabella 4.1** riporta, per ciascun PAF analizzato, la **superficie forestale (ha)** e la sua **ripartizione** in: (i) fustaia produttiva di conifere, (ii) fustaia produttiva mista, (iii) fustaia protettiva di conifere, (iv) fustaia protettiva mista, (v) aree turistico ricreative, (vi) boschi in fase di ricostituzione. La **Tabella 4.2** riporta la suddivisione della superficie forestale (ha) in base alla **categoria forestale**. Il 46,0% (4844,4 ha) della superficie forestale è composto da pecceta, seguito da lariceto (38,0%; 4014,1 ha) e pineta (5,2%; 551,4 ha). Le categorie forestali meno rappresentate sono: (i) betuleto (2,5 ha; 0,02%), (ii) abieteto (26,2 ha; 0,2%) e (iii) corileto (50,3 ha; 0,5%).

Tabella 4.1 - Superficie forestale e sua suddivisione per i PAF oggetto di indagine.

PAF	Superficie forestale	Fustaia produttiva di conifere	Fustaia produttiva mista	Fustaia protettiva di conifere	Fustaia protettiva mista	Aree turistico-ricreative	Boschi in ricostituzione
	ha						
Aprica	571,6	457,5	0,0	89,7	0,0	24,4	0,0
Grosio	2807,9	1713,6	104,7	810,1	179,5	0,0	0,0
Grosotto	1146,9	735,3	0,0	345,6	0,0	0,0	66,0
Lovero	158,5	132,0	0,0	26,5	0,0	0,0	0,0
Mazzo di Valtellina	234,3	160,9	0,0	52,6	0,0	20,8	0,0
Tovo S. Agata	83,9	26,6	0,0	57,3	0,0	0,0	0,0
Vervio	83,1	39,5	0,0	43,6	0,0	0,0	0,0
Valdidentro	2038,7	700,8	0,0	1302,4	35,6	0,0	0,0
Sondalo	2112,8	847,8	0,0	1262,5	2,5	0,0	0,0
Valfurva	1305,2	962,7	0,0	342,5	0,0	0,0	0,0
Totale	10542,9	5776,7	104,7	4332,7	217,6	45,1	66,0

Tabella 4.2 - Superficie forestale suddivisa per categorie forestali.

Categoria forestale	Superficie forestale ha (% sul totale)
Pecceta	4844,4 (46,0%)
Lariceto	4014,1 (38,0%)
Pineta	551,4 (5,2%)
Cembreta	506,7 (4,8%)
Mugheta	277,8 (2,6%)
Alneto	269,5 (2,5%)
Corileto	50,3 (0,5%)
Abieteto	26,2 (0,2%)
Betuleto	2,5 (0,02%)

4.1.2 Classe di accessibilità

La suddivisione della superficie in classe di accessibilità è fondamentale per definire correttamente le **tipologie di macchine impiegabili** per le operazioni di taglio e abbattimento,

allestimento e movimentazione (concentramento ed esbosco) del legname fino all'imposto⁴⁷. Il **48,4%** della superficie totale lorda dei PAF analizzati (**7412,4 ha**) è caratterizzato da **classe di accessibilità I**, il **36,0%** (**5521,2 ha**) si colloca in **classe di accessibilità II**, mentre il restante **15,6%** (**2369,4 ha**) è in **classe di accessibilità III**.

Il Comune con la superficie in **classe di accessibilità I** più elevata (**2181,2 ha; 56,8%** della superficie lorda PAF) è **Valdidentro**, seguito da Grosio (1553,1 ha; 47,9%) e Valfurva (1467,2 ha; 60,4%). Relativamente alla **classe di accessibilità II**, i tre Comuni con la maggiore superficie sono: (i) **Valdidentro** (**1450,5 ha; 37,8%**), (ii) Grosio (1239,8; 38,3%) e (iii) Sondalo (1099,5 ha; 35,3%). Infine, la **classe di accessibilità III** occupa la superficie maggiore nei Comuni di: (i) Sondalo (**1229,0 ha; 39,5%**), (ii) Grosio (450,6 ha; 13,9%) e (iii) Aprica (236,0 ha; 37,1%). Non è stato possibile calcolare il **numero di particelle forestali** incluse in una data classe di accessibilità perché nei PAF la superficie lorda di ciascuna particella può essere suddivisa in differenti classi. La **Figura 4.2** riporta la suddivisione della superficie lorda di ciascun PAF analizzato nelle tre classi di accessibilità.

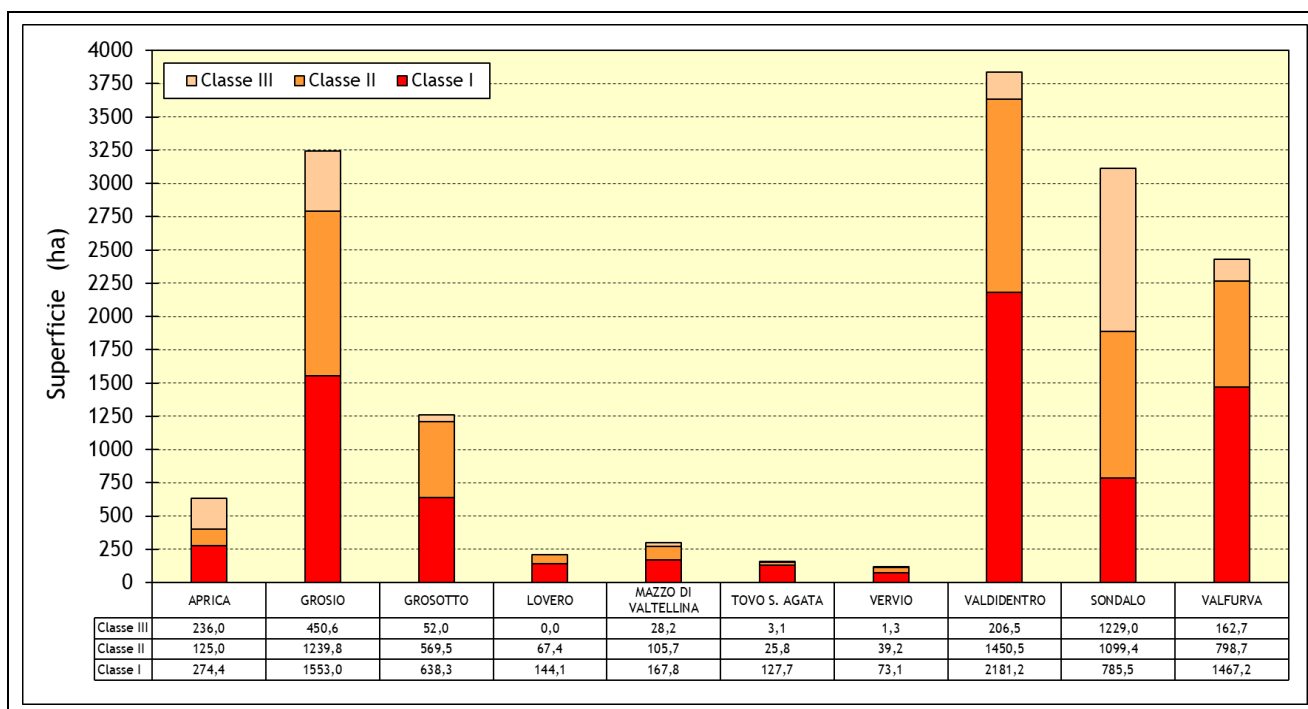


Figura 4.2 - Suddivisione della superficie lorda in classi di accessibilità per ciascun PAF analizzato.

⁴⁷

Piazzola - a bordo strada camionabile o trattorabile sufficientemente ampia da garantire la movimentazione delle macchine in sicurezza - in cui il legname esboscato viene accumulato per le successive operazioni di allestimento e trasporto all'utente finale (industria di prima trasformazione, impianto di teleriscaldamento/cogenerazione).

4.1.3 Classe altitudinale

La Tabella 4.3 riporta il numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe altitudinale.

Tabella 4.3 - Numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe altitudinale.

Classe altitudinale		N. particelle
Nome	Definizione	
Classe I	$0 \text{ m} \leq a < 500 \text{ m}$	0
Classe II	$500 \text{ m} \leq a < 1000 \text{ m}$	3
Classe III	$1000 \text{ m} \leq a < 1500 \text{ m}$	50
Classe IV	$1500 \text{ m} \leq a < 2000 \text{ m}$	216
Classe V	$2000 \text{ m} \leq a < 2500 \text{ m}$	224

L'1% delle particelle censite si trova in classe I e II, il 54% si trova in classe III e IV, mentre il restante 45% si colloca in classe V. La Figura 4.3 riporta, per ciascun PAF analizzato, il numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe altitudinale.

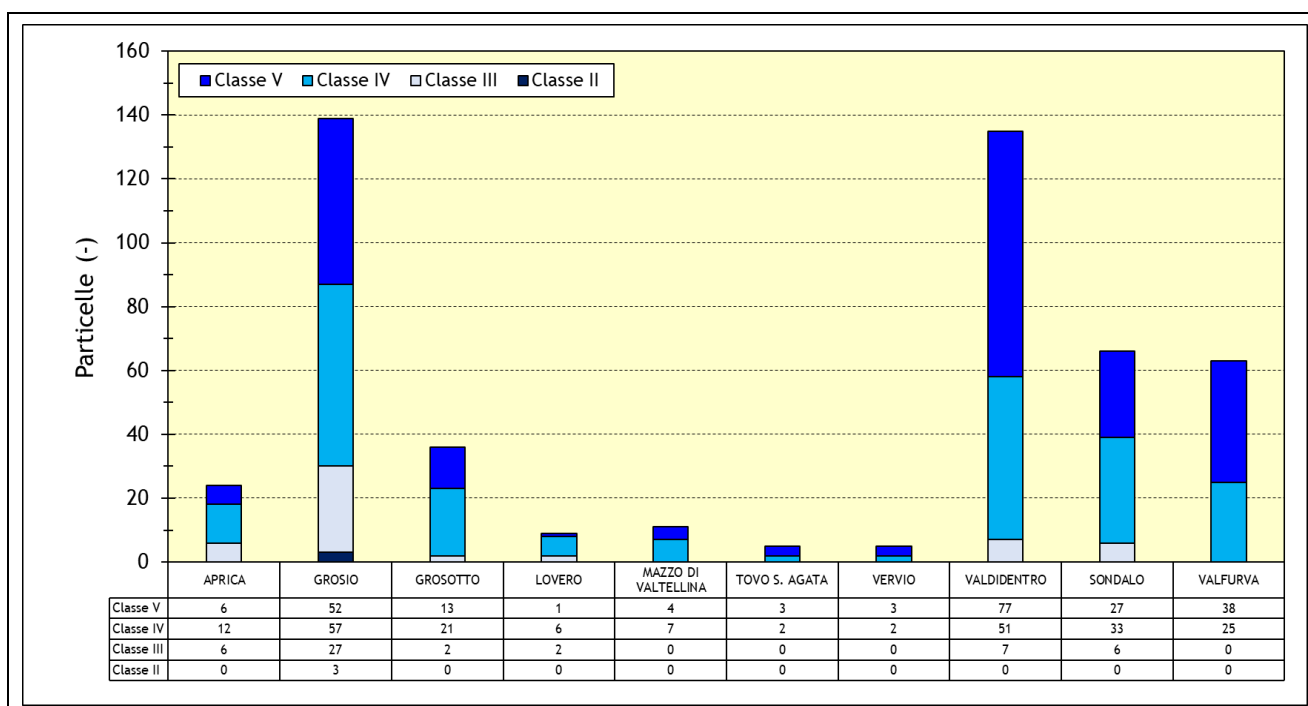


Figura 4.3 - Numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe altitudinale per ciascun PAF analizzato.

La superficie in classe IV e classe V è maggiormente rappresentata nei tre Comuni di Sondalo, Valdidentro e Valfurva. Complessivamente, in tali Comuni, la superficie in Classe IV ammonta a 3150,8 ha (56,3% della superficie totale ricadente in questa Classe), mentre la superficie in

Classe V raggiunge **6006,3 ha** (69,5% della superficie totale della Classe). Il Comune di Grosio detiene il 100% della superficie in Classe II (69,6 ha); in altre parole, tutta la superficie in Classe II appartiene al Comune di Grosio. I Comuni di Sondalo, Valdidentro e Valfurva contribuiscono per il 77,4% (765,6 ha) della superficie ricadente in Classe III. La **Figura 4.4** riporta la suddivisione della superficie lorda dei PAF analizzati in classi altitudinali.

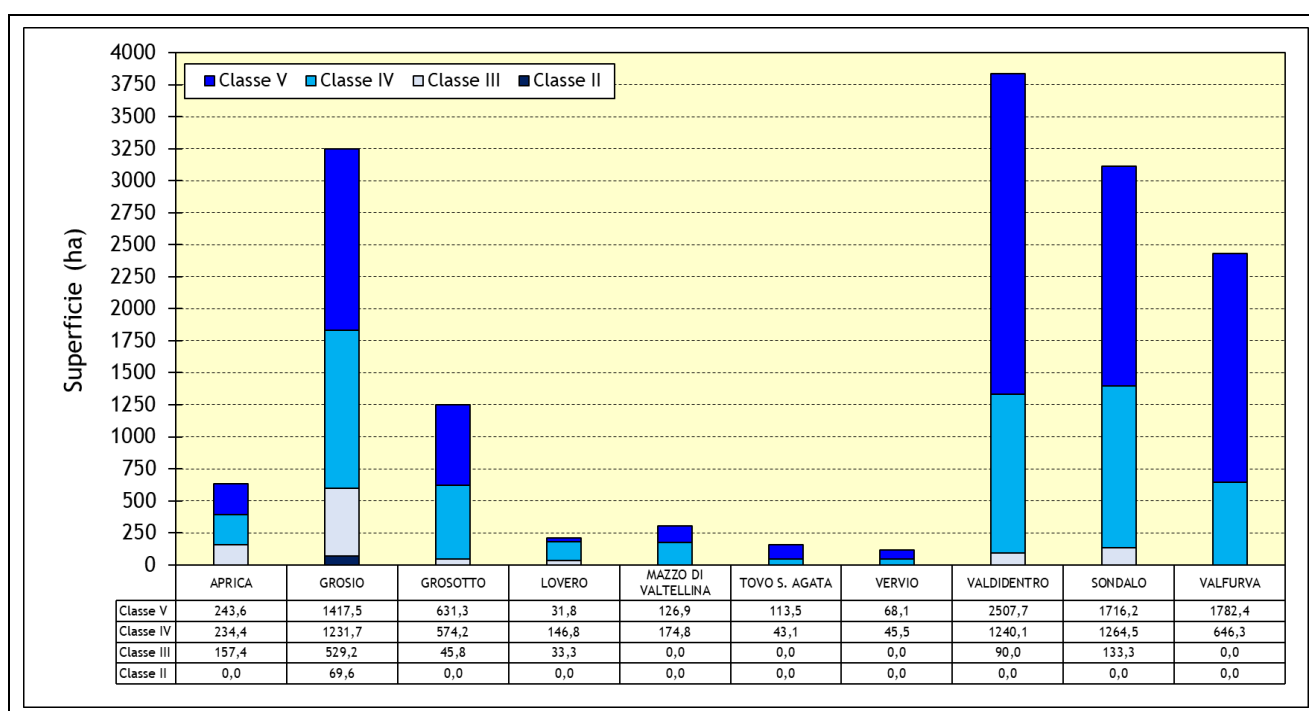


Figura 4.4 - Suddivisione della superficie lorda in classi altitudinali per ciascun PAF analizzato.

4.1.4 Classe di pendenza

La **Tabella 4.4** riporta il numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe di pendenza.

Tabella 4.4 - Numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe di pendenza.

Classe di pendenza		N. particelle
Nome	Definizione	
Classe I	$0\% \leq p_M < 20\%$	4
Classe II	$20\% \leq p_M < 40\%$	28
Classe III	$40\% \leq p_M < 60\%$	179
Classe IV	$60\% \leq p_M < 80\%$	230
Classe V	$80\% \leq p_M < 100\%$	44
Classe VI	$p_M \geq 100\%$	8

Come per la classe di accessibilità e la classe altitudinale, i PAF analizzati sono caratterizzati da una **elevata eterogeneità**. **Grosio**, ad esempio, detiene il numero più elevato di particelle (89,1%) in **classe IV**, mentre per **Valdidentro** il numero più elevato (57,8%) si registra per la **Classe III**. Tale PAF è anche l'unico con particelle in **Classe I** (4 in totale). **Sondalo**, invece, detiene 24 particelle (36% delle totali del PAF) in Classe IV, il 50% in Classe V e il 10,6% in Classe VI (Figura 4.5).

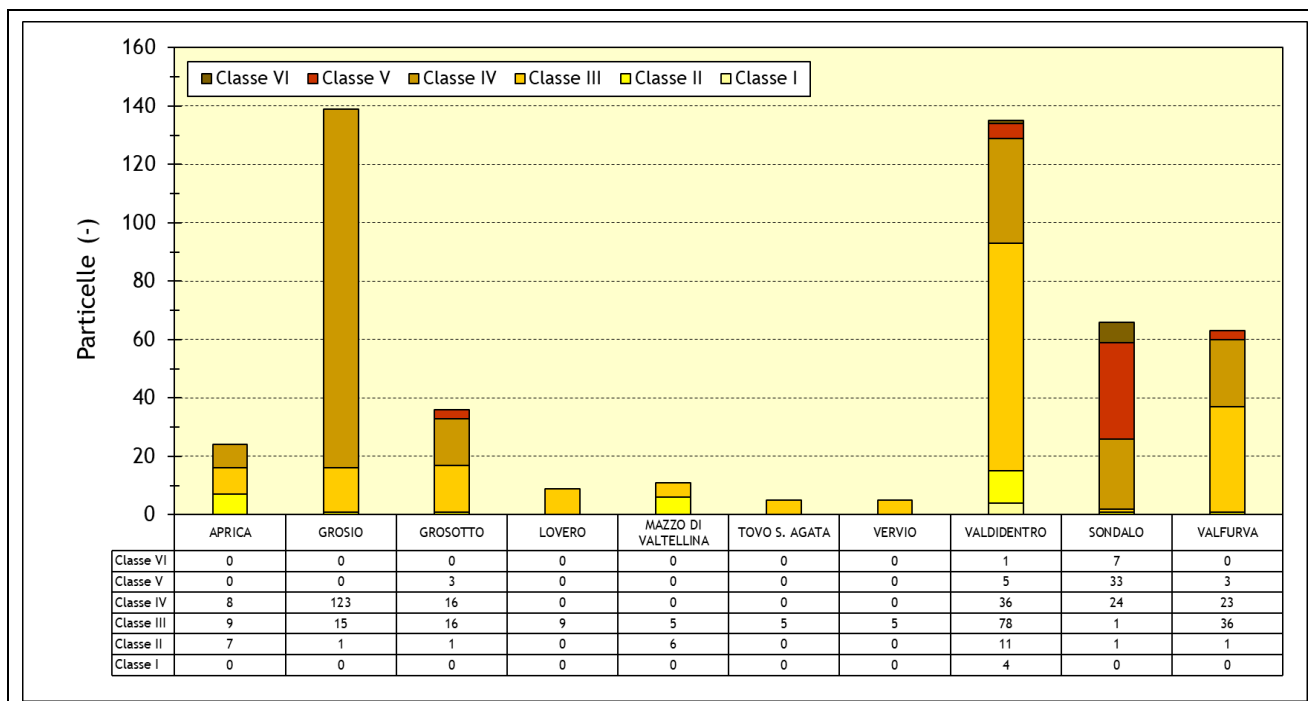


Figura 4.5 - Numero di particelle ascrivibili a ciascuna classe di pendenza per ciascun PAF analizzato.

Relativamente alla **superficie**, quella **preponderante (6662,8 ha; 43,6% della totale lorda)** risulta essere in **Classe IV**, seguita da quella in Classe III (5303,0 ha; 34,7%), Classe V (2284,4 ha; 14,9%), Classe II (619,5 ha; 4,0%), Classe VI (304,9 ha; 2,0%) e infine la Classe I (124,1 ha; 0,8%). In base a tali risultati è ragionevole supporre che la gestione forestale di tali aree, specialmente in termini di macchine impiegabili per gli **interventi selvicolturali** e **logistica** ad esse associata risulta **particolarmente complessa**. La **Figura 4.6** riporta la suddivisione della superficie lorda dei PAF analizzati in classi di pendenza.

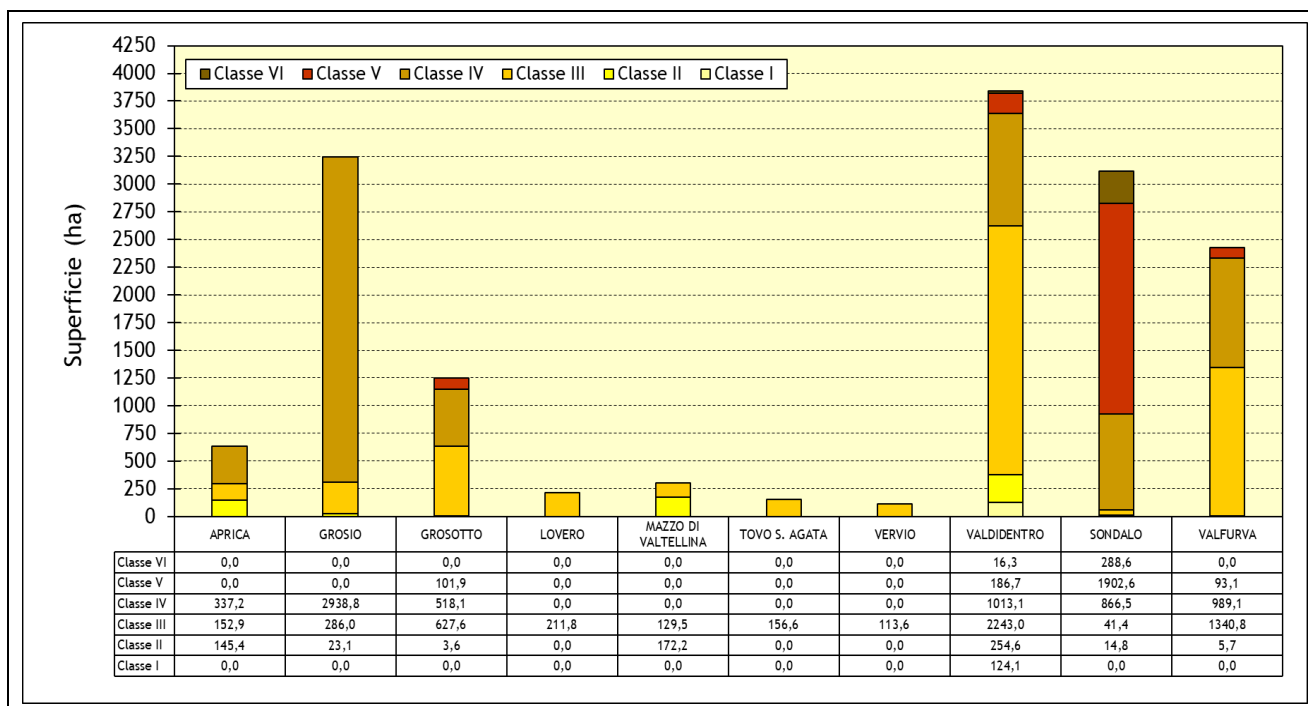


Figura 4.6 - Suddivisione della superficie lorda in classi di pendenza per ciascun PAF analizzato.

4.2 Prelievi effettuati

Nel periodo analizzato (2005 - 2021), sono stati effettuati complessivamente **411 prelievi** in **210 particelle** (min = 1; max = 6 prelievi per particella). In maggiore dettaglio, dal **2005 al 2015** il numero dei prelievi è stato piuttosto ridotto (**prelievi totali: 62**); in tale periodo, gli anni caratterizzati dal maggior numero di prelievi sono il 2014 (14), il 2012 (11) e il 2013 (9). Nel 2005 e nel 2015 non sono stati registrati prelievi. A partire dall'anno **2016**, si è registrato un **considerevole aumento** dei prelievi effettuati, grazie sia all'**entrata in vigore dei PAF** di: (i) Valfurva (anno 2016), (ii) Grosotto (anno 2017), (iii) Sondalo (anno 2018) e Valdidentro (anno 2021), sia all'incremento del numero degli **interventi selvicolturali in particelle già gestite**. Dal 2017 al 2018 il numero di prelievi è diminuito (da 35 a 30), per poi aumentare nuovamente fino al 2021. Il **periodo 2019-2021** è caratterizzato dal **maggior numero di prelievi** (complessivamente 221, pari al **53,8% del totale**), 98 dei quali eseguiti nel 2021, 68 nel 2020 e i restanti 55 nel 2019. Nell'illustrare tale situazione occorre tuttavia evidenziare che, per **25 prelievi**, la **data di esecuzione non era disponibile (Figura 4.7)**. Questa lacuna riguarda esclusivamente i prelievi effettuati nei PAF della Comunità Montana di Tirano. Per i tre Comuni della Comunità Montana Alta Valtellina invece, non risultano date di utilizzazione mancanti.

Il considerevole aumento del numero dei prelievi dopo il 2018 è da ricondursi essenzialmente al verificarsi della **tempesta Vaia** (28-31 ottobre 2018), che ha reso necessario intervenire

urgentemente sui soprassuoli, sia per evitare successive infestazioni di *Ips typographus*, sia per porre in condizioni di sicurezza le aree danneggiate.

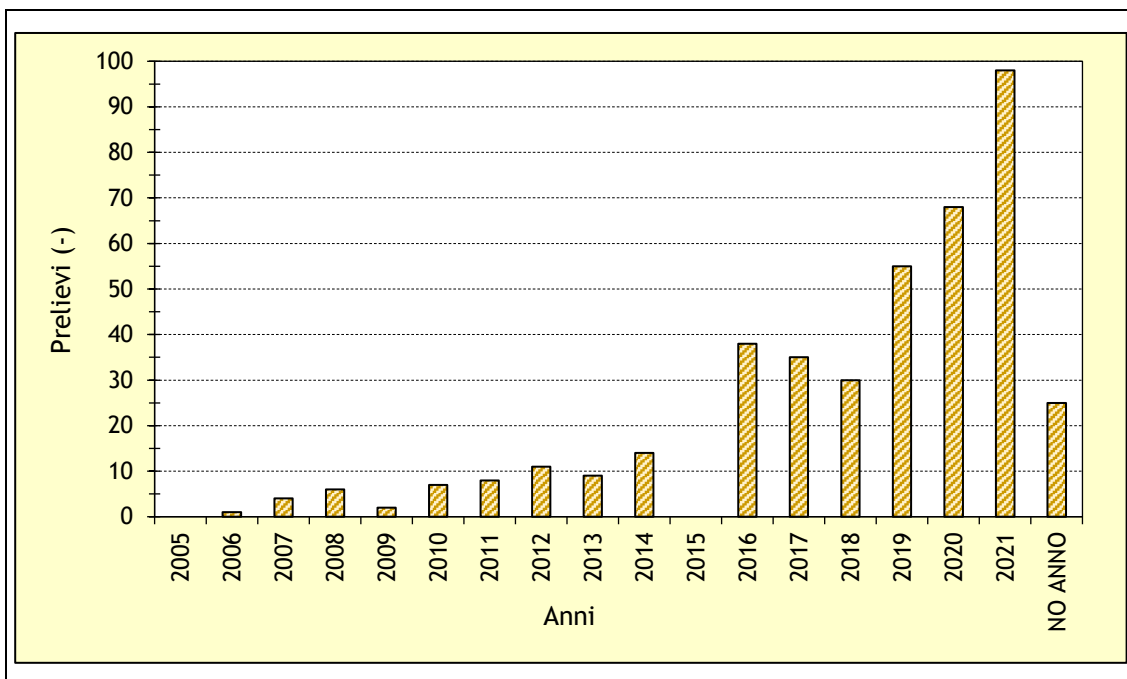


Figura 4.7 - Prelievi effettuati sulle particelle forestali demaniali.

Non a caso, la **superficie delle particelle interessate dai prelievi** nel periodo analizzato presenta un andamento del tutto simile a quello del numero dei prelievi (Figura 4.8). La massima superficie delle particelle sottoposte a prelievo in un anno nell'intero periodo è pari a circa $2432,1 \text{ ha}\cdot\text{anno}^{-1}$ (2021), quella minima a $16,1 \text{ ha}\cdot\text{anno}^{-1}$ (2006).

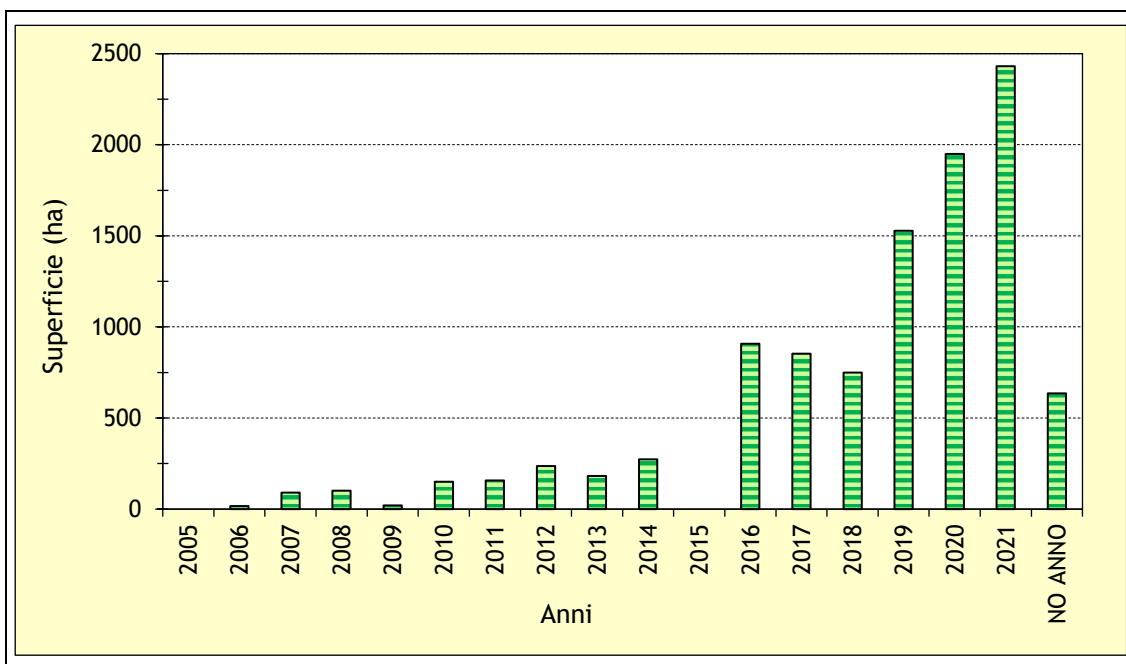


Figura 4.8 - Superficie forestale delle particelle interessate dai prelievi.

Il medesimo andamento si riscontra anche per il **volume (e per la massa) cormometrica lorda prelevata**; anche in questo caso, infatti, la considerevole discrepanza tra gli anni precedenti il 2016 e quelli successivi, è dovuta ai fenomeni sopra menzionati. Nel periodo analizzato è stato prelevato **complessivamente un volume cormometrico lordo pari a 44760,1 m³ (20479,4 t SS)**; questo valore include anche **13033,2 m³ (7168,3 t SS)** la cui data di prelievo non risulta disponibile dalle istanze di taglio.

Escludendo le 7168,3 t SS non attribuibili ad anni specifici, l'anno in cui è stata prelevata più massa cormometrica (**1941,6 t SS, corrispondenti a 4832,0 m³**) è il **2020**, seguito dal **2012** (**1677,4 t SS; 4275,4 m³**) e dal **2021** (**1603,5 t SS; 3461,0 m³**). Questi tre anni insieme contribuiscono a più del 39% della massa totale prelevata. L'anno con il prelievo più basso è il **2006 (74,0 t SS)**.

Rispetto al triennio **2009-2011**, nel triennio **2012-2014** la massa cormometrica prelevata è considerevolmente più elevata (**135,3%**; da **1738,5 t SS a 4090,2 t SS**), come conseguenza del fatto che il **numero di prelievi è raddoppiato** (da 17 a 34, rispettivamente per il primo e secondo triennio).

Dal **2016 al 2019** la situazione risulta **piuttosto altalenante**, con una massa cormometrica prelevata pari a: (i) 519,5 t SS nel 2016, (ii) 806,0 t SS nel 2017, (iii) 413,2 t SS nel 2018, (iv) 866,2 t SS nel 2019. Nel biennio **2020-2021** si registra un **repentino aumento della massa prelevata (3545,0 t SS complessive)**. Tale situazione è dovuta sia ai fenomeni precedentemente descritti (**entrata in vigore di nuovi PAF, aumento dei prelievi effettuati a causa del verificarsi della tempesta Vaia**) sia compresenza di **numerosi prelievi ma di piccole**

entità (Figura 4.9). Confrontando la Figura 4.9 con la Figura 4.7 si può osservare che, nonostante per anni non noti il numero di prelievi effettuati risulti modesto rispetto al totale (6,0%), la massa cormometrica prelevata è la più alta in assoluto (7168,2 t SS; 35% della massa totale prelevata nel periodo 2005-2021), indice del fatto che, in tali anni, sono stati effettuati prelievi di elevata entità (286,7 t SS per prelievo, mediamente).

Il PAF con la maggiore massa prelevata è quello di Grosio (7713,9 t SS; 37,5% della massa complessiva del periodo), seguito da Grosotto (3990,7 t SS; 19,5%) e Valfurva (3122,7 t SS; 15,3%). Diversamente, i Comuni con la massa cormometrica prelevata più bassa sono quelli di Tovo S. Agata (42,6 t SS; 0,2%), Sondalo (486,4 t SS; 2,4%) e Vervio (528,2 t SS; 2,6%).

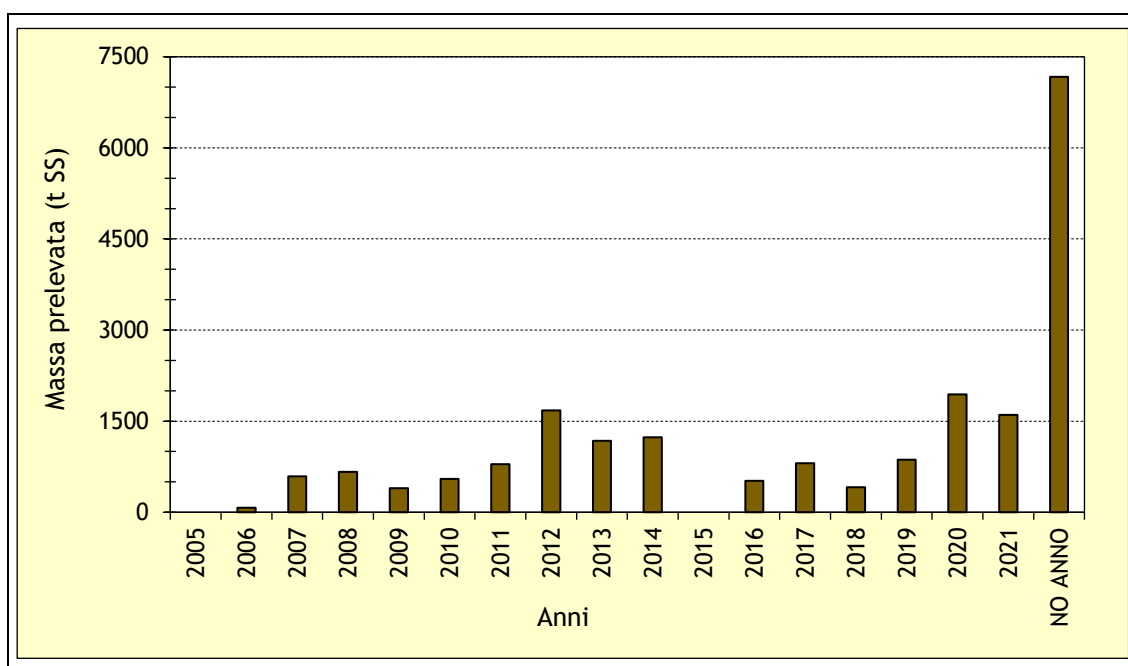


Figura 4.9 - Massa cormometrica lorda prelevata totale.

La Tabella 4.5 mostra il numero dei prelievi effettuati e la corrispondente massa cormometrica lorda prelevata (t SS) per ciascun PAF analizzato nel periodo di riferimento. Sono inclusi anche i prelievi effettuati in anni non noti.

Tabella 4.5 - Numero di prelievi effettuati e massa cormometrica lorda prelevata per ciascun PAF analizzato.

PAF	Prelievi Totali (-)	Massa cormometrica lorda prelevata (t SS)
Aprica	15	1713,2
Grosio	51	7713,9
Grosotto	12	3990,7
Lovero	8	1276,9
Mazzo di Valtellina	10	766,2
Tovo S. Agata	2	42,56
Vervio	4	528,2
Valdidentro	44	541,7
Sondalo	67	486,4
Valfurva	192	3122,7
Totale	411	20479,4

Per rendere **confrontabili** le masse prelevate in **anni differenti**, i risultati sono stati espressi sull'unità di superficie forestale della particella. È stato quindi predisposto un grafico che riporta, in ciascun anno, la **resa di legno prelevato** ($t \cdot ha^{-1} SS$) (**Figura 4.10**).

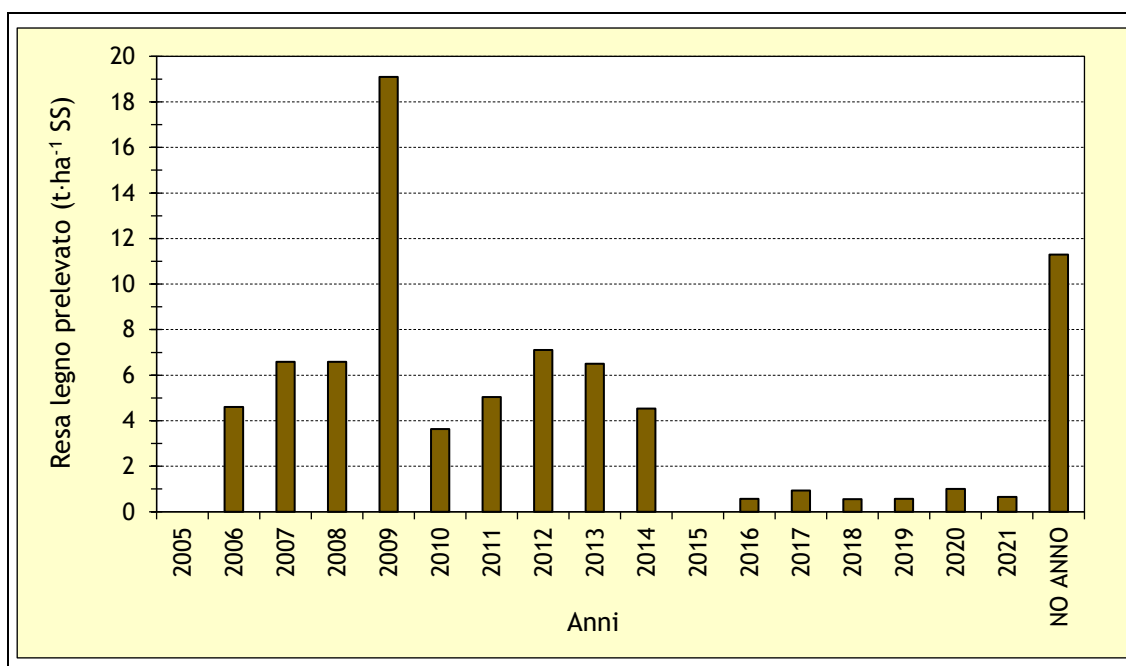


Figura 4.10 - Resa del legno prelevato (2005-2021).

Confrontando la **Figura 4.10** con la **Figura 4.8**, **4.9** e **4.10** si osserva che il biennio 2020-2021 è caratterizzato da una massa cormometrica prelevata maggiore rispetto a tutti gli altri anni del periodo analizzato (1941,6 t SS e 1603,5 t SS, nel 2020 e 2021, rispettivamente); le rese, però ($1,0 \pm 2,7 t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1} SS$ e $0,7 \pm 1,6 t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1} SS$ nel 2020 e 2021, rispettivamente), risultano

simili a quelle del periodo 2016-2019; nonostante nel biennio 2020-2021 il numero dei prelievi effettuati e la massa prelevata siano considerevolmente **più elevati** rispetto al periodo 2016-2019, anche la superficie forestale delle particelle oggetto del prelievo è notevolmente più elevata; questo determina, come risultato, una resa nel biennio 2020-2021 equiparabile a quella del periodo 2016-2019.

Nel periodo **2006-2014** (ad eccezione del 2009), la resa varia in un intervallo piuttosto limitato, tra **3,6 ± 3,0 t·ha⁻¹·anno⁻¹ SS (2010)** e **7,1 ± 4,0 t·ha⁻¹·anno⁻¹ SS (2012)**. Il **2009** è senza dubbio un anno anomalo: nonostante la superficie delle particelle interessate sia equiparabile a quella del 2006 (16,1 ha e 20,8 ha nel 2006 e 2009, rispettivamente), e siano stati eseguiti solo **2 prelievi**, la massa prelevata nel 2009 è considerevolmente più elevata (74,0 t SS e 397,0 t SS nel 2006 e 2009, rispettivamente).

Le tre **specie legnose** maggiormente interessate dai prelievi sono state: (i) ***Picea abies* L.** (11058 t SS; 54%), (ii) ***Pinus sylvestris* L.** (5119,9 t SS; 25%) e (iii) ***Larix decidua* Mill.** (3276,7 t SS; 16%). In **misura minore**, i prelievi interessano anche: (i) ***Abies alba* Mill.** (ii) ***Pinus cembra* L.** e (iii) ***Alnus viridis* (Chaix) DC.** che, insieme costituiscono solo il **5% (1024,0 t SS)** della massa totale prelevata.

4.3 Legno e Carbonio

4.3.1 Scenario 1

I seguenti risultati sono stati ottenuti impiegando per il parametro “**fattore di espansione della biomassa**” un **valore costante** per ciascun Codice Univoco di Classificazione (cfr. Paragrafo 3.3.1).

Per specifiche esigenze del modello di calcolo WOCAS v2, nelle elaborazioni seguenti non è stato purtroppo possibile includere i prelievi effettuati in anni non noti.

4.3.1.1 Residui epigei e ipogei potenzialmente producibili

La massa totale di **residui epigei (ramaglia e cimali) potenzialmente producibili** a seguito del prelievo della massa cormometrica ammonta a **3760,2 t SS**.

La massa di **residui ipogei (radici con diametro ≥ 2 mm) potenzialmente producibili** è, invece, pari a **3855,2 t SS**. La **Figura 4.11** riporta la massa (t SS) di residui epigei e ipogei potenzialmente producibili per ciascun anno analizzato. Le masse di residui sono state calcolate mediante il modello WOCAS v2 a partire dal valore di massa cormometrica prelevata in uno specifico anno. Siccome però per 7168,2 t SS il riferimento dell'anno non era disponibile nelle istanze di taglio (**Figura 4.9**), tali masse di residui fanno riferimento **esclusivamente** alla massa

cormometrica con **anno di prelievo noto**. Pertanto, la massa di residui potenzialmente producibile è sicuramente **sottostimata**. Ipotizzando un valore medio del parametro k_7 e k_8 pari a 1,30 e 0,30, rispettivamente, è ragionevole supporre che la massa di residui comprensiva anche delle suddette 7168,2 t SS ammonti, per entrambi, a 2150,5 t SS. Complessivamente, dunque, la massa di residui epigei e ipogei ammonterebbe ragionevolmente a 5910,7 t SS e 6005,7 t SS, rispettivamente.

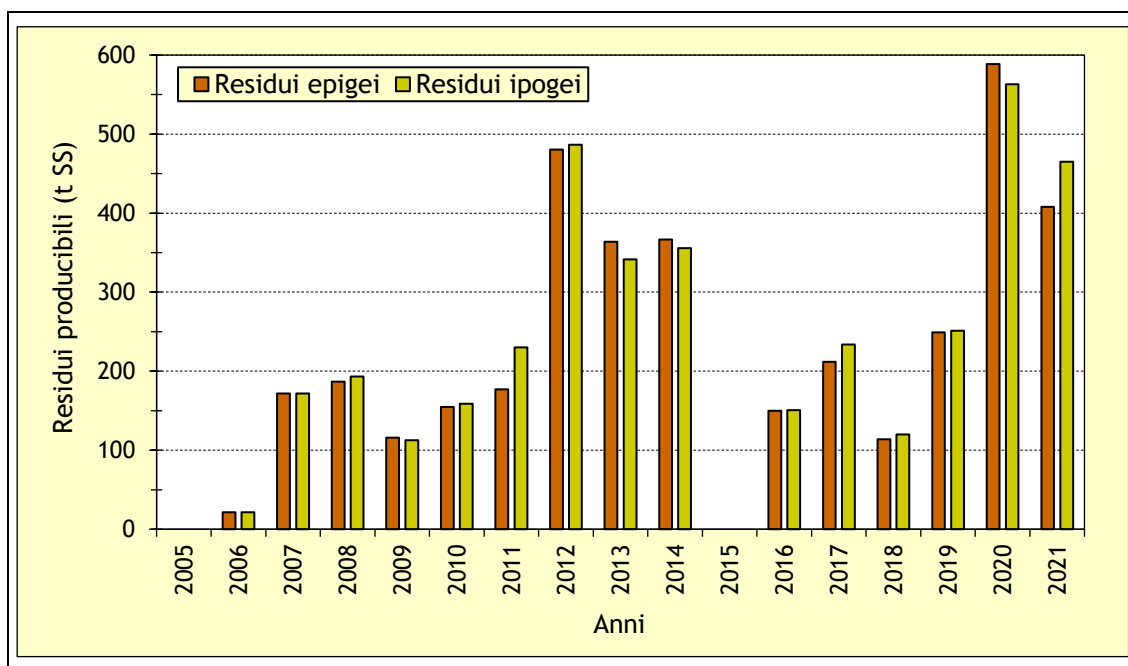


Figura 4.11 - Residui epigei e ipogei potenzialmente producibili (2005-2021).

Come per la massa cormometrica prelevata, per confrontare valori relativi ad anni differenti e a superficie differenti, i valori totali precedentemente riportati sono stati espressi sull'unità di superficie (**Figura 4.12**). Siccome la massa di residui epigei e ipogei è quantificata dal modello semplicemente come una frazione della massa cormometrica, è evidente che l'andamento dei valori unitari risulta completamente equiparabile a quello della massa prelevata.

Il biennio 2020-2021 è caratterizzato da una massa totale residuale maggiore in termini assoluti rispetto a tutti gli altri anni del periodo analizzato (1151,7 t SS e 873,1 t SS, nel 2020 e 2021, rispettivamente); i valori unitari, però ($0,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1}$ SS e $0,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1}$ SS nel 2020 e 2021, rispettivamente), risultano simili a quelli del periodo 2016-2019 e considerevolmente più bassi di quelli del periodo 2006-2014. In quest'ultimo periodo i residui epigei potenzialmente producibili per unità di superficie variano (ad eccezione del 2009) in un intervallo piuttosto limitato, tra $1,0 \pm 1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1}$ SS (2010) e $2,0 \pm 1,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1}$ SS (2012), mentre per i residui ipogei

l'intervallo di variazione è compreso tra $1,1 \pm 0,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1} \text{ SS}$ (2010) e $2,1 \pm 1,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{anno}^{-1} \text{ SS}$ (2012).

Per i medesimi motivi già espressi per la massa cormometrica prelevata, il **2009** risulta un anno **decisamente anomalo**, con una massa di residui (epigei + ipogei) superiori di cinque volte rispetto a quella del 2006 (42,9 t SS e 228,6 t SS nel 2006 e 2009, rispettivamente); per tale motivo il 2009 è l'anno con la resa **più elevata** ($5,6 \pm 2,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$; $5,4 \pm 1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ di residui epigei e ipogei, rispettivamente).

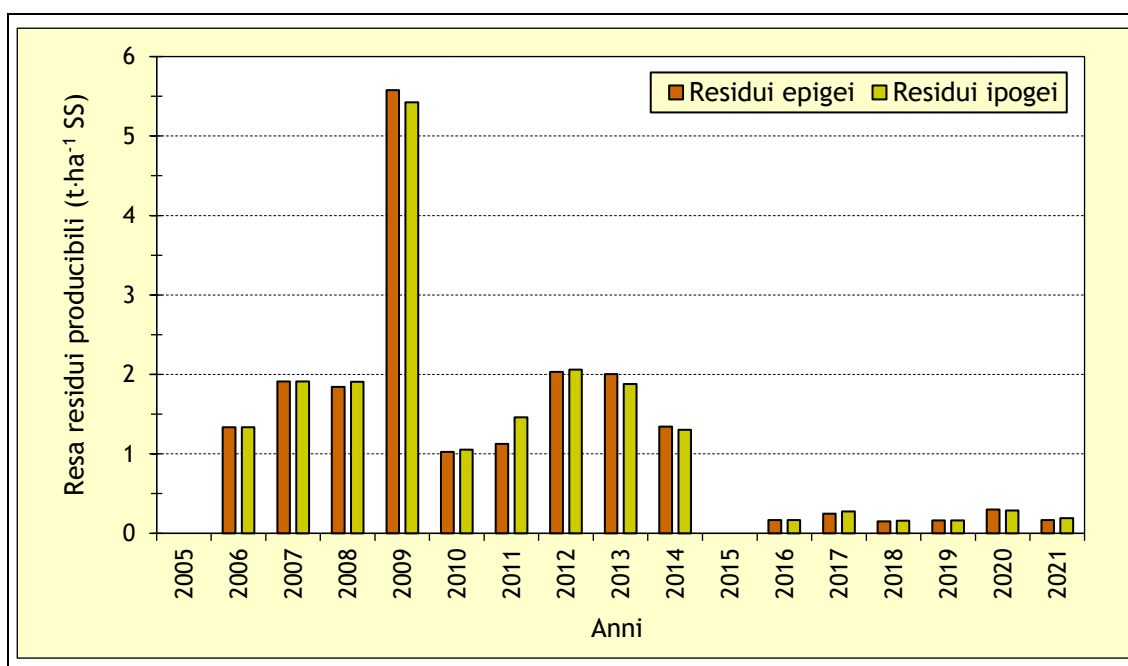


Figura 4.12 - Resa media ponderata di residui epigei e ipogei potenzialmente producibili (2005-2021).

4.3.1.2 Biomassa legnosa epigea e ipogea

La **massa legnosa viva totale**, data dalla somma della massa legnosa viva epigea e ipogea relativa a ciascuna particella forestale, varia da **288330,9 t SS** (2005) a **1650794,9 t SS** (2021) (Figura 4.13). L'anno con la resa più bassa è il 2005 ($102,7 \pm 47,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$; 81,8% biomassa epigea; 18,2% biomassa ipogea), mentre quello con la massa più elevata è il 2016 ($156,7 \pm 67,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$; 81,6% biomassa epigea; 18,4% biomassa ipogea), seguito dal 2017 ($156,1 \pm 65,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$) e dal 2021 ($156,6 \pm 74,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$) (Figura 4.14). I valori elevati di deviazione standard derivano sostanzialmente dall'inclusione nell'analisi di particelle con elevata superficie e bassa massa legnosa, e viceversa.

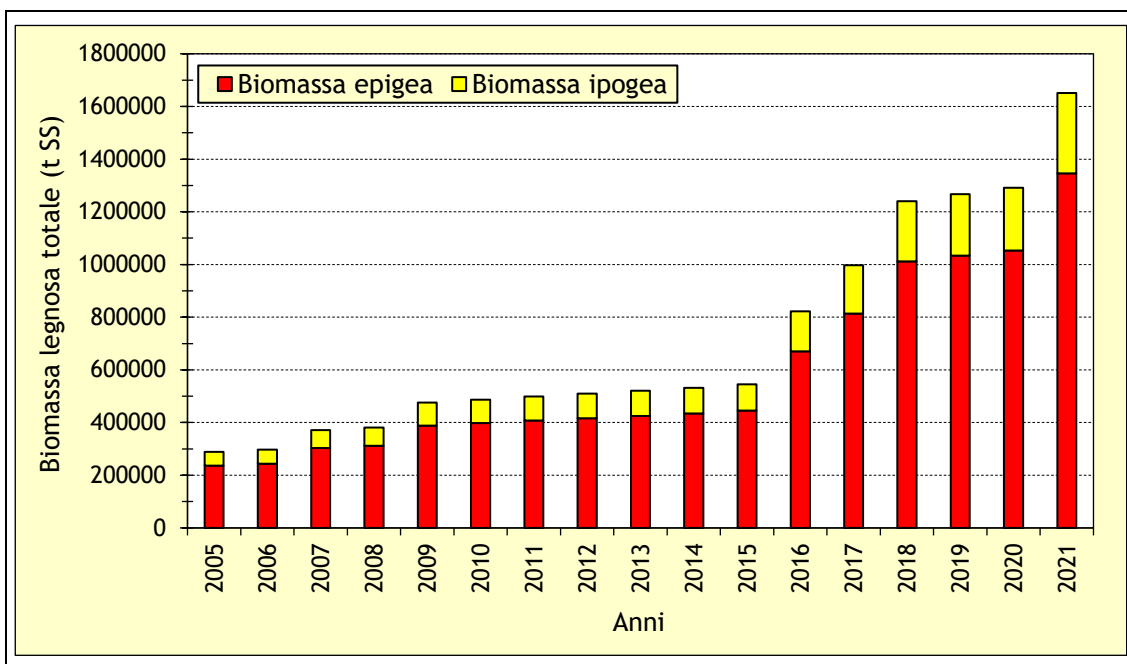


Figura 4.13 - Biomassa legnosa epigea e ipogea (2005-2021).

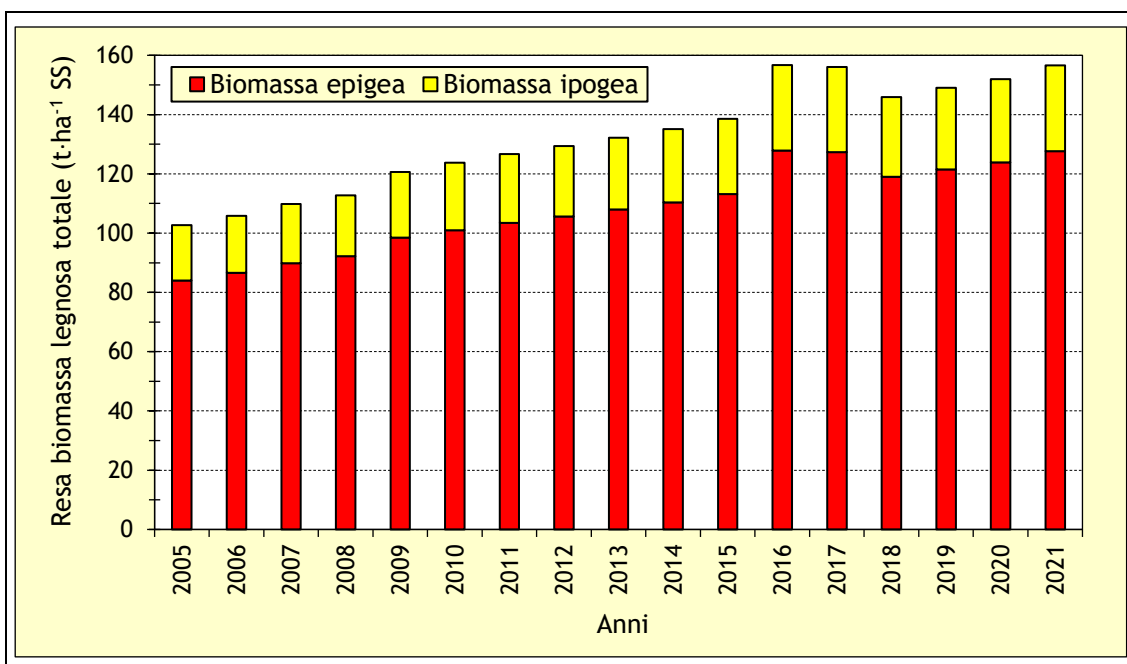


Figura 4.14 - Resa media ponderata di biomassa legnosa epigea e ipogea (2005-2021).

Dal 2005 al 2015 si assiste a un **aumento piuttosto lineare** della resa di biomassa (da $102,7 \pm 48,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ a $138,5 \pm 56,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$). Nel biennio 2016-2017, rispetto al 2015, nonostante vi sia un **aumento della massa cormometrica prelevata**, i valori aumentano considerevolmente per l'inclusione nell'analisi di **due nuovi PAF con superfici forestali ridotte e massa cormometrica elevata**. La diminuzione della resa in biomassa legnosa nel 2018 è causata sia dal verificarsi

della “tempesta Vaia”, sia dalla **maggiore massa prelevata nel 2017** (con conseguenze nel 2018) e dall’inclusione nell’analisi di un PAF con **superficie forestali elevate e massa cormometrica ridotta**.

In generale, passando dal 2005 al 2021, le rese aumentano, a causa di differenti fattori: (i) entrata in vigore di nuovi PAF, (ii) crescita forestale in particelle già gestite con PAF, (iii) tasso di prelievo (TP = rapporto tra massa cormometrica prelevata e incremento netto) sempre inferiore all’unità.

La **Figura 4.15** evidenzia che il TP a **livello territoriale** e per tutto il periodo analizzato, varia da **0,013 (2006)** a **0,203 (2012)**, con **differenze considerevoli** tra i diversi anni in relazione agli **obiettivi gestionali**, che possono variare in base alle caratteristiche delle particelle. Dal 2009 al 2014 il tasso di prelievo aumenta in modo sostanzialmente lineare (ad eccezione del 2012 in cui l’aumento è considerevolmente più marcato), per poi mantenersi piuttosto stabile nel periodo 2016-2019 e infine aumentare nuovamente nel biennio 2020-2021.

I bassi valori del TP ottenuti nell’area Valtellinese di studio suggeriscono che gli interventi selvicolturali sono stati condotti rispettando il criterio della **gestione forestale sostenibile**, secondo cui la massa prelevata deve risultare inferiore all’incremento netto. Da ciò si desume pertanto che **si sarebbe potuto prelevare una massa cormometrica sensibilmente maggiore senza peggiorare le caratteristiche dei soprassuoli**.

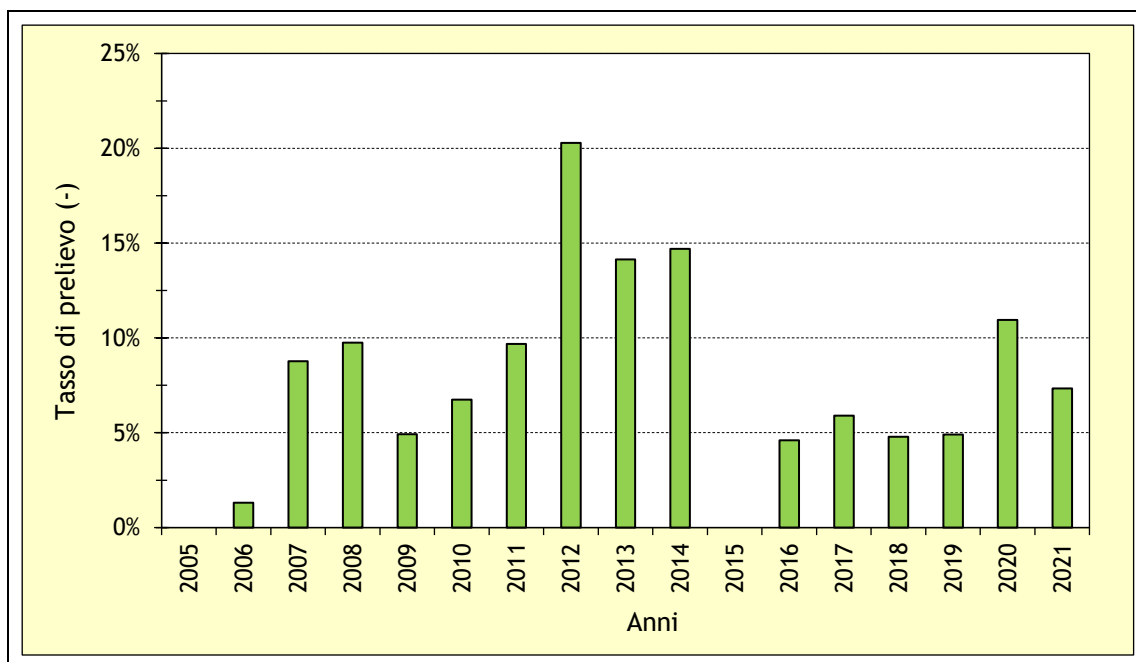


Figura 4.14 - Tasso di prelievo della massa cormometrica lorda (2005-2021).

4.3.1.3 Sostanza organica morta

La sostanza organica morta risulta avere un andamento simile a quello della biomassa viva, passando da **54792,4 t SS (19,0% della biomassa viva)** nel 2005 a **269634,5 t SS (16,3% della biomassa viva)** nel 2021 (Figura 4.16).

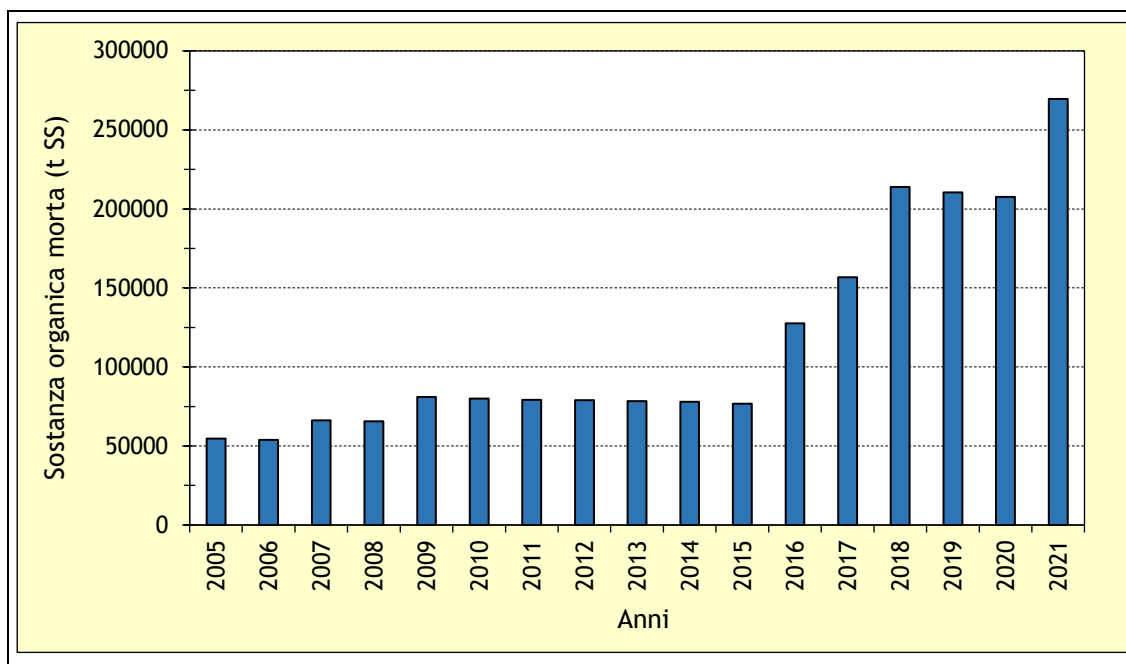


Figura 4.16 - Sostanza organica morta (2005-2021).

Per ciascun anno, il valore ottenuto è il risultato di **differenti processi che avvengono contemporaneamente**, quali produzione di residui in seguito al prelievo di massa cormometrica, **mortalità naturale** per auto-diradamento, competizione per acqua, luce ed elementi nutritivi e eventuali **disturbi naturali**, e **decomposizione**. L'intensità di tali processi varia anno per anno in base alle caratteristiche delle particelle. A **scala di particella**, un aumento dei prelievi provoca, nel breve periodo, una diminuzione della biomassa viva e un corrispondente aumento della sostanza organica morta, e viceversa; a **livello territoriale**, invece, la sostanza organica morta può subire ulteriori variazioni a seconda dell'inclusione nell'analisi di nuove particelle e delle relative caratteristiche.

La resa varia da **19,5 ± 9,6 t·ha⁻¹ SS (2005)** a **25,6 ± 16,1 t·ha⁻¹ SS (2021)**. Nel periodo 2005-2015 la resa varia entro **intervalli limitati**, da **19,5 ± 9,6 t·ha⁻¹ SS (2005)** a **20,6 ± 11,1 t·ha⁻¹ SS (2009)**. Dal 2015 al 2016 la resa cresce considerevolmente, passando da **19,5 ± 10,4 t·ha⁻¹ SS** a **24,3 ± 14,6 t·ha⁻¹ SS**. Nel periodo 2017-2021, invece, la resa risulta piuttosto costante (da **24,5 ± 13,8 t·ha⁻¹ SS** a **25,6 ± 16,1 t·ha⁻¹ SS** nel 2017 e 2021, rispettivamente). Nel 2018,

parallelamente alla diminuzione della biomassa legnosa viva causata dalla **tempesta Vaia**, si assiste ad un **aumento della resa di sostanza organica morta** (Figura 4.17).

Tale aumento risulta comunque limitato, in quanto l'**intensità del disturbo è stata moderata**, sia in termini di **numero di particelle colpite (38 su 493; 7,7%)**, sia - relativamente alle particelle colpite - in termini di **superficie forestale effettivamente interessata dal disturbo (85,5 ha; 0,8%** della superficie forestale complessiva). Infatti, la superficie forestale è stata colpita completamente per una particella soltanto; per tutte le altre, la superficie interessata dal disturbo varia dallo **0,1% al 45,4%** della superficie forestale della particella. Gli elevati valori di deviazione standard possono essere spiegati attraverso le medesime considerazioni precedentemente menzionate per la biomassa viva.

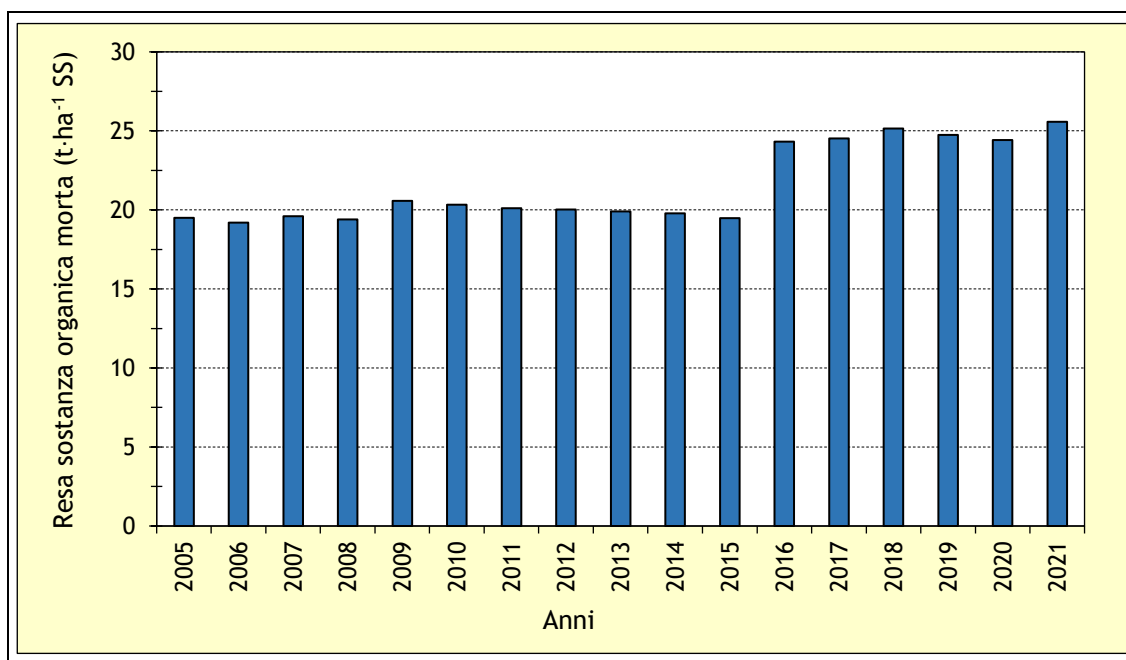


Figura 4.17 - Resa media ponderata di sostanza organica morta (2005-2021).

4.3.1.4 Carbonio

La resa media ponderata di C nella biomassa epigea varia da $41,6 \pm 19,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2005) a $63,1 \pm 27,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2016), mentre quella nella biomassa ipogea varia da $9,3 \pm 4,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2005) a $14,3 \pm 6,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021); infine, la resa di C nella sostanza organica morta varia da $9,5 \pm 4,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2006) a $12,64 \pm 7,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021). Complessivamente, la **resa media ponderata di C** varia da $60,5 \pm 28,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2005) a $89,9 \pm 44,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021).

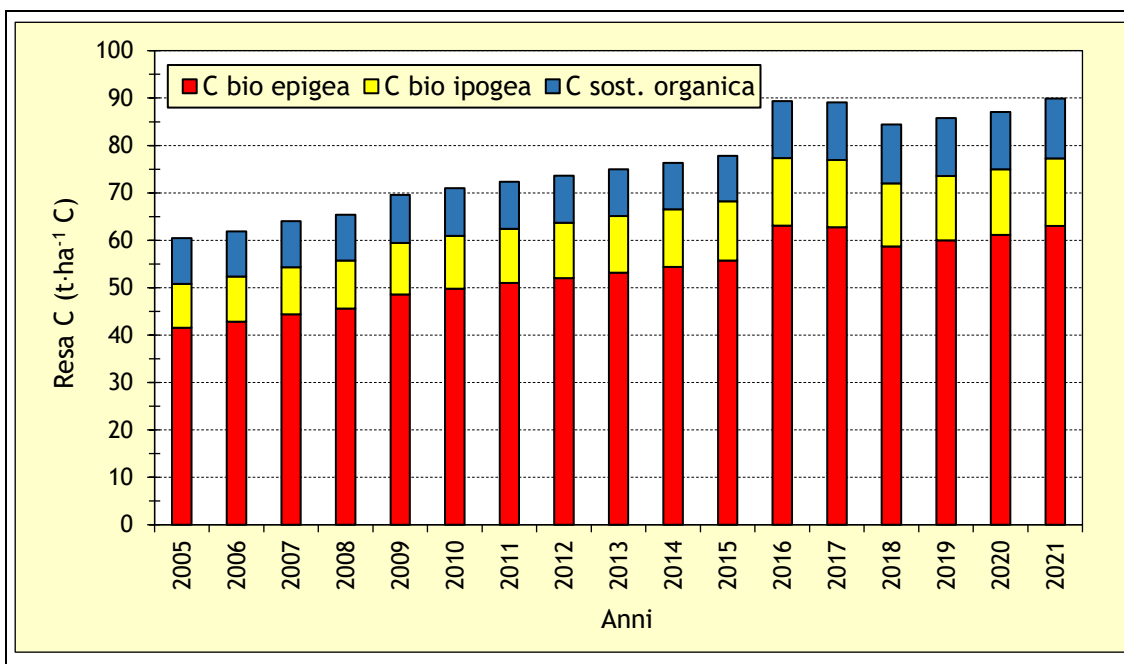


Figura 4.18 - Resa media ponderata di C (2005-2021).

4.3.2 Scenario 2

I seguenti risultati sono stati ottenuti impiegando per il parametro “fattore di espansione della biomassa” un valore variabile per ciascuna particella forestale (cfr. Paragrafo 3.3.1).

Per specifiche esigenze del modello di calcolo WOCAS v2, nelle elaborazioni seguenti non è stato purtroppo possibile includere i prelievi effettuati in anni non noti.

4.3.2.1 Residui epigei e ipogei potenzialmente producibili

La massa totale di **residui epigei potenzialmente producibili** ammonta a **1988,1 t SS**. La massa di **residui ipogei** è pari a 3855,2 t SS (Figura 4.19). Tale valore è il medesimo di quello calcolato per lo Scenario 1: l'applicazione di valori variabili del parametro k_7 , infatti, non indice sulla quantificazione della biomassa radicale. Le motivazioni circa l'andamento della massa di residui epigei e ipogei sono le medesime di quelle precedentemente esposte (paragrafo 4.3.1.1).

Come per lo Scenario 1, la massa di residui calcolata partendo dalla massa cormometrica è **sottostimata** in quanto nel modello WOCAS v2 la massa cormometrica prelevata in anni non noti è stata inevitabilmente esclusa per esigenze di calcolo. Nello Scenario 2, la massa residuale calcolata è il 52,8% circa di quella calcolata nello Scenario 1. Applicando questa percentuale alla massa residuale dello Scenario 1 associata ad anni non noti, è ragionevole supporre che, per lo Scenario 2, la massa residuale associata ad anni non noti sia indicativamente pari a **1135,4 t SS**. Complessivamente, dunque, la massa di residui epigei comprensiva anche di quella associata ad anni non noti è pari a **3124,0 t SS**.

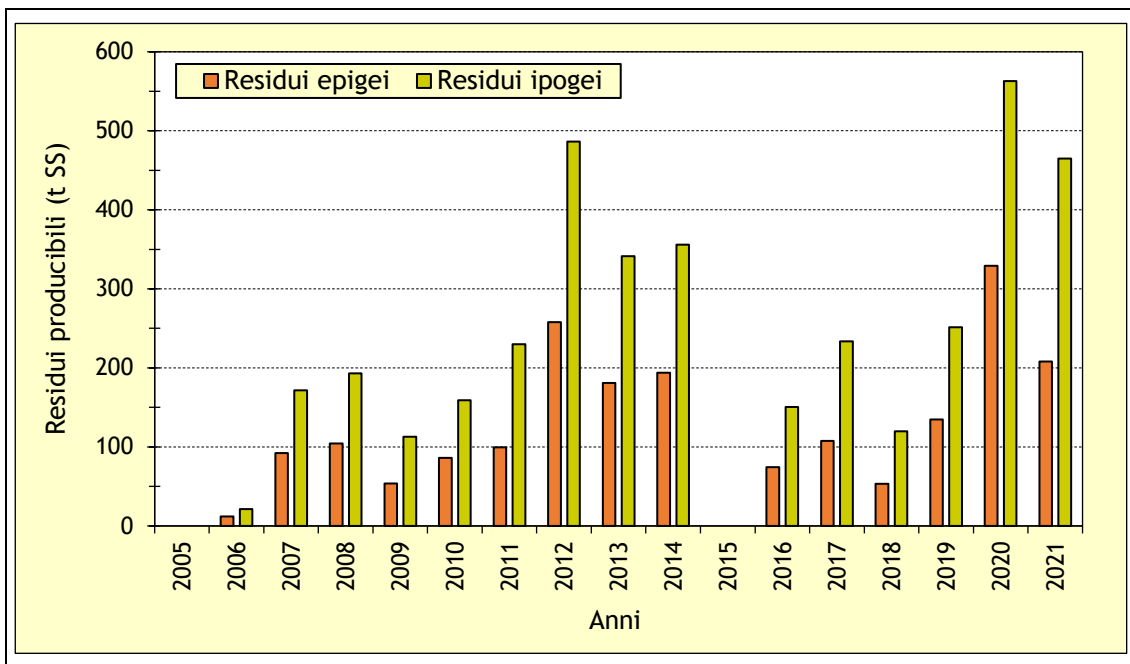


Figura 4.19 - Residui epigei e ipogei potenzialmente producibili (2005-2021).

La Figura 4.20 riporta i valori espressi sull'unità di superficie. Anche in questo caso, le motivazioni circa l'andamento delle masse sono le medesime di quelle espone nello Scenario 1.

Il biennio 2020-2021 è caratterizzato da una massa totale residuale maggiore in termini assoluti rispetto a tutti gli altri anni del periodo analizzato (892,4 t SS e 673,0 t SS per il 2020 e 2021, rispettivamente); le rese, però (0,5 t·ha⁻¹·anno⁻¹ di SS e 0,3 t·ha⁻¹·anno⁻¹ di SS nel 2020 e 2021, rispettivamente), risultano simili a quelle del periodo 2016-2019 e considerevolmente più basse di quelle del periodo 2006-2014.

In quest'ultimo periodo le rese di residui epigei variano (ad eccezione del 2009) in un intervallo piuttosto limitato, tra 0,6 ± 0,5 t·ha⁻¹·anno⁻¹ SS (2010) e 0,6 ± 0,6 t·ha⁻¹·anno⁻¹ SS (2012). Per i medesimi motivi già espressi nello Scenario 1, il 2009 è l'anno caratterizzato dalla resa più elevata (2,6 ± 0,8 t·ha⁻¹ SS; 5,4 ± 1,1 t·ha⁻¹ SS di residui epigei e ipogei, rispettivamente).

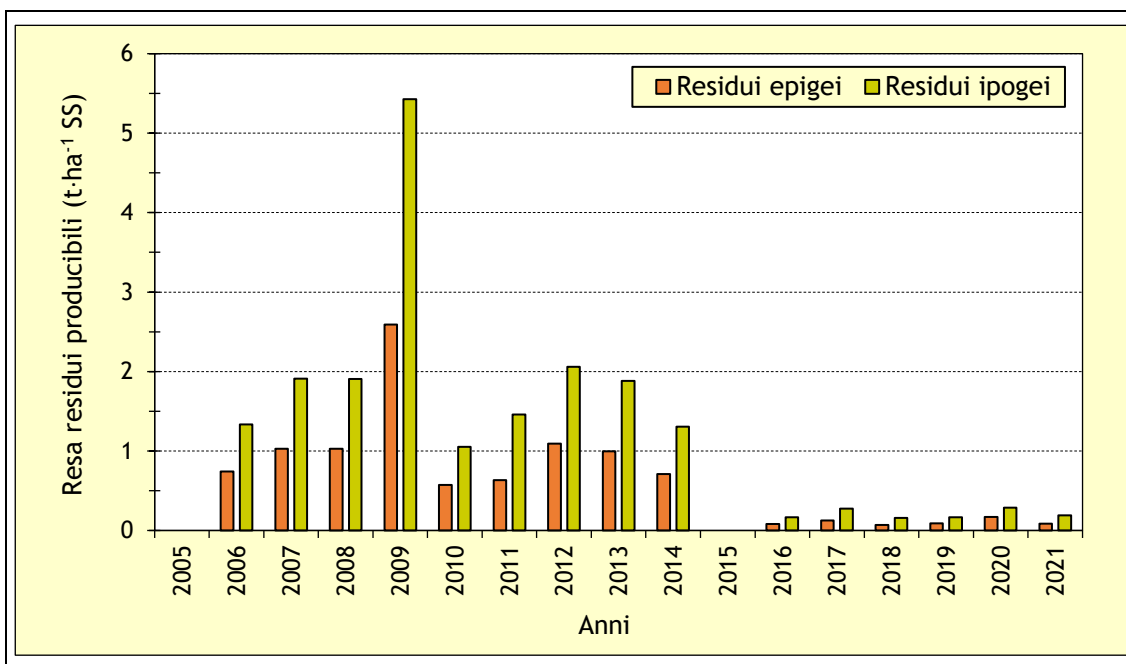


Figura 4.20 - Resa media ponderata di residui epigei e ipogei potenzialmente producibili (2005-2021).

4.3.2.2 Biomassa legnosa epigea e ipogea

La massa legnosa viva totale varia da 263617,9 t SS (2005) a 1533060,1 t SS (2021) (Figura 4.21). Per unità di superficie, la resa varia da $93,9 \pm 42,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$; (2005; 80,1% biomassa epigea; 19,9% biomassa ipogea) a $145,4 \pm 76,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ (2021; 80,1% biomassa epigea; 19,9% biomassa ipogea) (Figura 4.22).

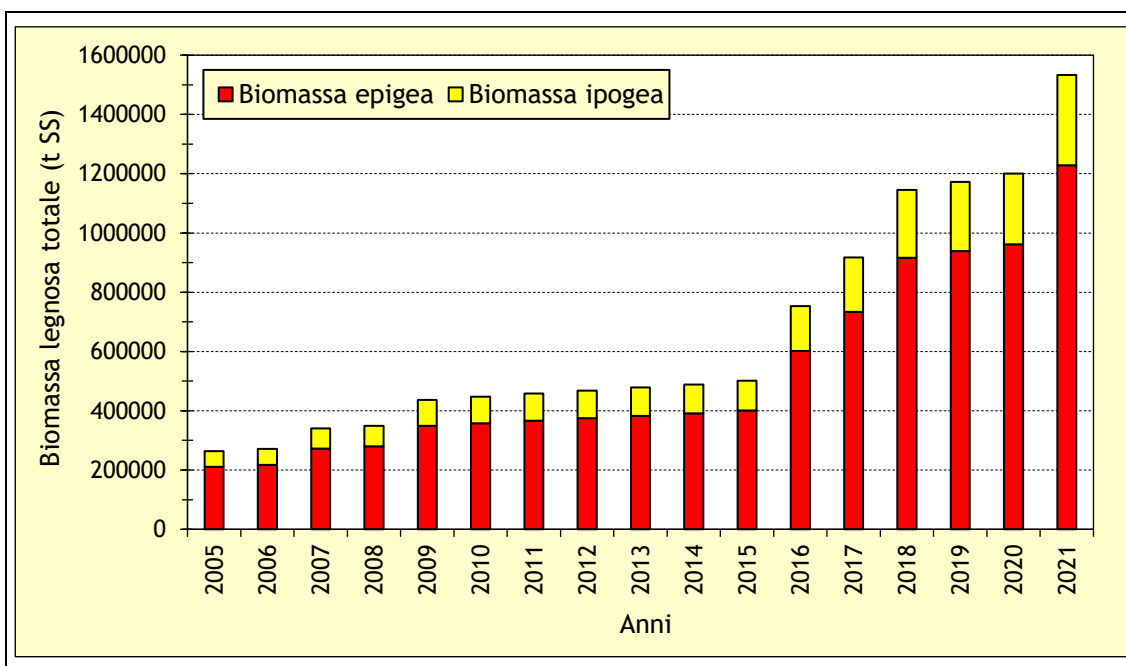


Figura 4.21 - Biomassa legnosa epigea e ipogea totale (2005-2021).

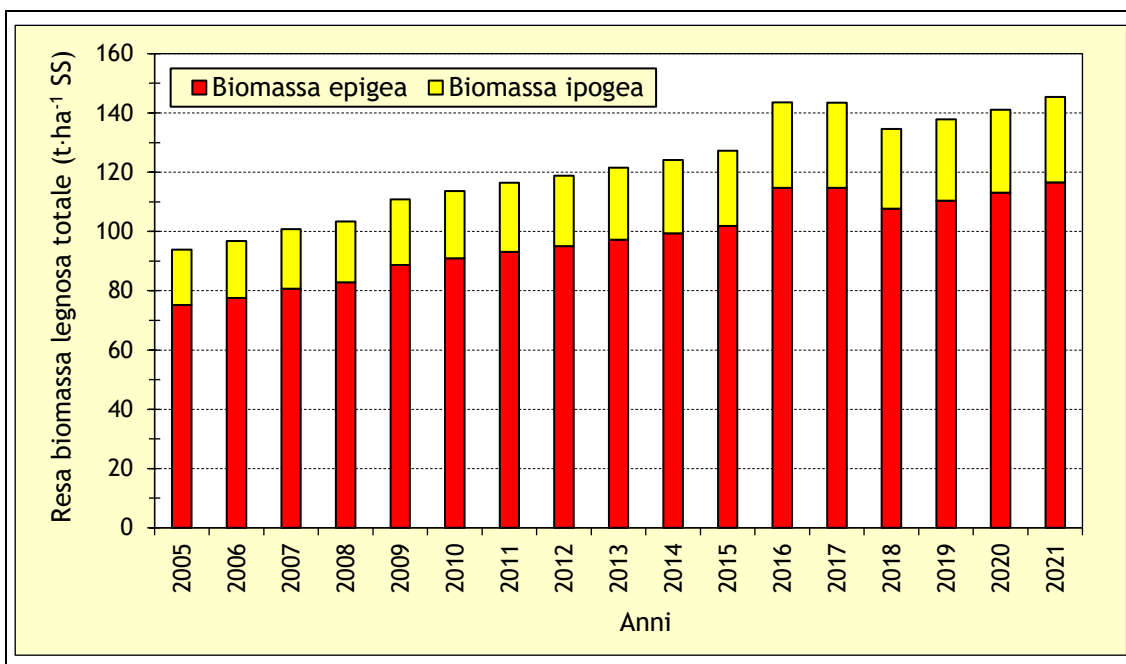


Figura 4.22 - Resa media ponderata di biomassa legnosa epigea e ipogea (2005-2021).

L'andamento della resa di biomassa epigea e ipogea è equiparabile a quello dello Scenario 1 e le motivazioni di tale andamento sono le medesime di quelle già precedentemente esposte.

4.3.2.3 Sostanza organica morta

La sostanza organica passa da **48436,0 t SS (17,8% della biomassa viva)** nel 2006 a **244272,8 t SS (15,9% della biomassa viva)** nel 2021 (Figura 4.23).

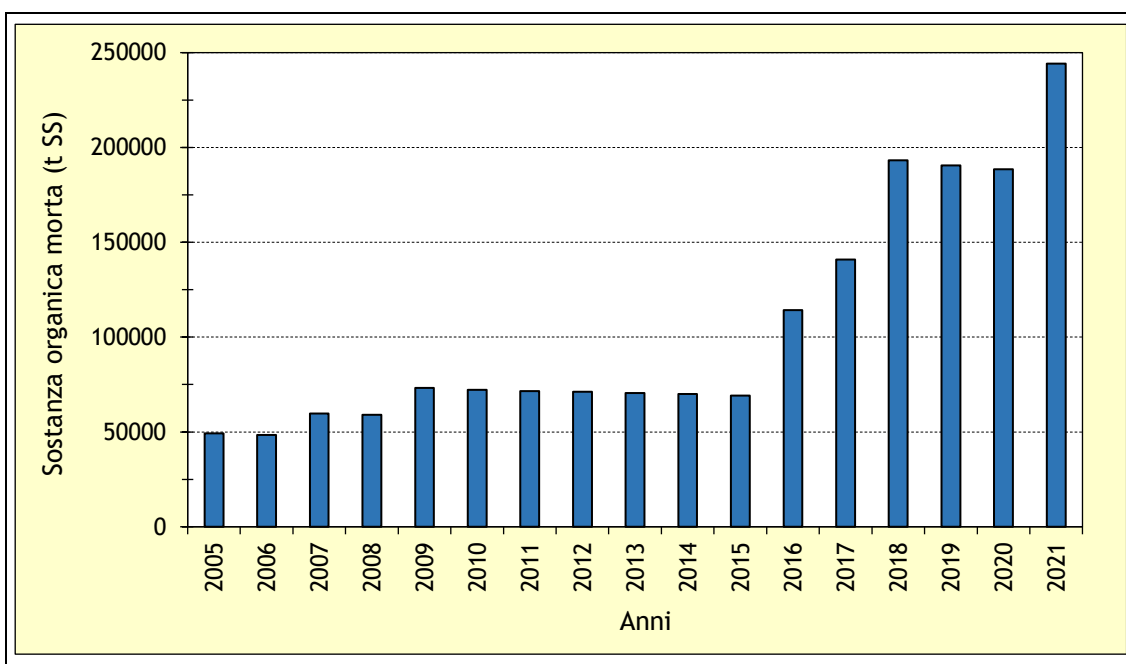


Figura 4.23 - Sostanza organica morta (2005-2021).

La resa varia da $17,5 \pm 8,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ (2005) a $23,2 \pm 14,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ (2021). Nel periodo 2005-2015 la resa varia entro intervalli limitati, da $17,5 \pm 8,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ (2005) a $18,6 \pm 8,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ (2009). Dal 2015 al 2016 la resa cresce considerevolmente, passando da $17,5 \pm 9,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ a $21,8 \pm 12,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$. Nel periodo 2017-2021, invece, la resa risulta piuttosto costante (da $22,1 \pm 12,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ a $23,2 \pm 14,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ SS}$ nel 2017 e 2021, rispettivamente). Anche per questo “pool” l’andamento della resa negli anni è spiegato con le medesime motivazioni già introdotte nello Scenario 1.

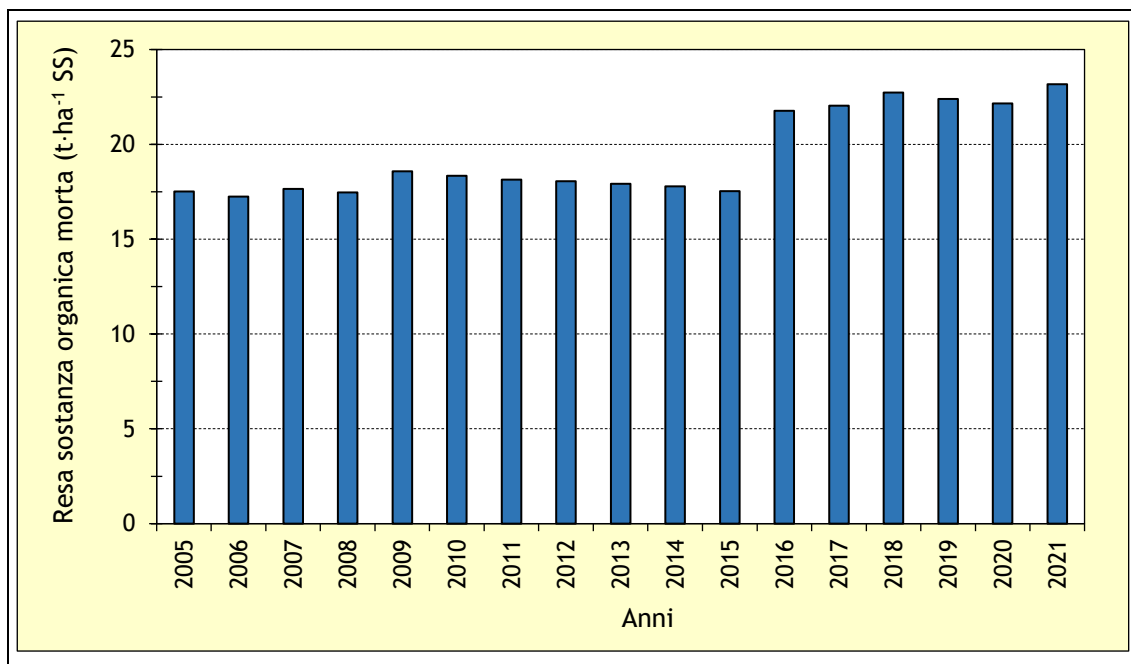


Figura 4.24 - Resa media ponderata di sostanza organica morta (2005-2021).

4.3.2.4 Carbonio

La resa media ponderata di C nella biomassa epigea varia da $37,2 \pm 16,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2005) a $57,5 \pm 33,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021), mentre quella nella sostanza organica morta varia da $8,5 \pm 4,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2006) a $11,5 \pm 7,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021); infine, la resa media ponderata di C nella biomassa ipogea rimane la medesima di quella precedentemente calcolata con lo Scenario 1 (da $9,2 \pm 4,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ a $14,3 \pm 6,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$, per il 2005 e il 2021, rispettivamente). Complessivamente, la resa media ponderata di C varia da $55,1 \pm 25,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2005) a $83,2 \pm 44,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ C}$ (2021).

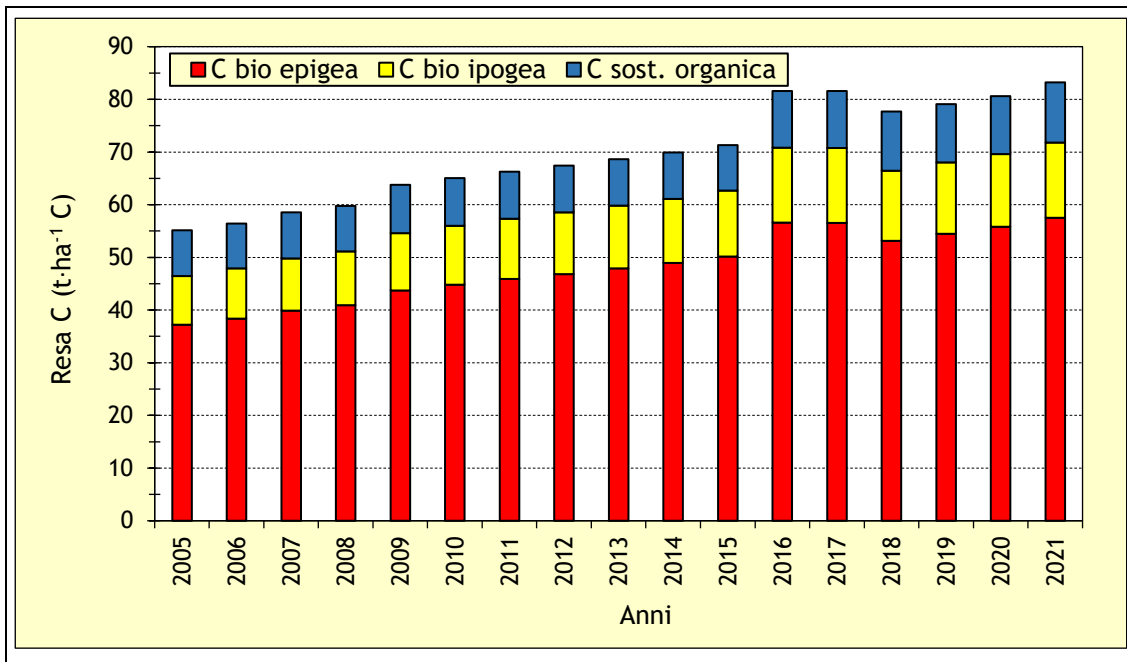


Figura 4.25 - Resa media ponderata di C (2005-2021).

4.3.3 Scenario 1 e Scenario 2: confronto e considerazioni generali

L'impiego di valori costanti del parametro k_7 (fattore di espansione della biomassa) può causare **sottostima** della biomassa in **popolamenti giovani e meno produttivi** e, viceversa, **sovrastima** in **popolamenti più vecchi e produttivi** (Goodale et al., 2002). La massa di legno include direttamente gli effetti che età, modalità di gestione, produttività e condizioni climatiche e ambientali hanno sulla tendenza alla ramificazione della pianta, e pertanto può essere impiegato come variabile indipendente per la stima dei fattori di espansione senza la necessità di reperire ulteriori informazioni.

I fattori di espansione calcolati in base alla massa del soprassuolo forniscono generalmente risultati più accurati rispetto a quelli calcolati in base dell'età (Fang et al., 2002; Teobaldelli et al., 2009). Tuttavia, il metodo proposto da Teobaldelli et al. (2009), e impiegato anche nel presente Elaborato, è caratterizzato da una **approssimazione importante** e cioè assume che una bassa massa cormometrica corrisponda a una giovane età della particella, e viceversa. Questa **linearità massa-età** non sempre si verifica nella realtà; particelle caratterizzate dalla stessa massa possono avere differenti età, in base alla modalità di gestione e alle condizioni ambientali. Pertanto, tale metodo non dovrebbe essere utilizzato a priori, ma solo se le reali condizioni delle particelle fossero note. Inoltre, i parametri della funzione di regressione sono stati stimati sulla base di informazioni relative a soprassuoli forestali di aree anche molto diverse tra loro come modalità di gestione e condizioni di crescita. Per tale motivo, i valori del parametro k_7 ottenuti con il metodo di Teobaldelli et al. (2009) non dovrebbero mai sostituire valori locali, che dovrebbero sempre essere impiegati se disponibili. Per avvalorare

ulteriormente questo valore e analizzare le possibili differenze ottenibili con l'applicazione di valori di k_7 differenti, nel presente Elaborato sono stati impiegati sia valori di k_7 riportati in Federici et al. (2008) e definiti per differenti specie forestali italiane, sia valori calcolati secondo il metodo di Teobaldelli et al. (2009).

Valori specifici dei fattori di espansione della biomassa per **foreste alpine italiane** sono stati recentemente sviluppati anche da Zambelli et al. (2012) a partire dai dati sulla produzione di biomassa residuale raccolti da Spinelli e Magagnotti (2007). I dati riportati da Spinelli e Magagnotti (2007) si riferiscono a condizioni di lavoro rilevate in Italia orientale, dove sono stati eseguiti specifici tagli e tecnologie di recupero della biomassa. Per questo motivo, i valori proposti da Zambelli et al. (2012) non sono stati considerati in questo lavoro.

Confrontando i risultati ottenuti nei due Scenari emerge che l'impiego nel modello di **valori variabili** del fattore di espansione della biomassa determina una **resa di biomassa** ($t \cdot ha^{-1}$ SS) e - conseguentemente anche di C - nei differenti "pools" **più bassa**, mediamente tra 7,4% (2020) e 8,8% rispetto a quella correlata all'impiego di valori costanti del parametro. La **Figura 4.26** riporta la **resa media ponderata totale di C** ($t \cdot ha^{-1}$ C) nei due scenari analizzati, calcolata come somma della resa media ponderata di C di ciascun *pool* (biomassa epigea, biomassa ipogea, sostanza organica morta).

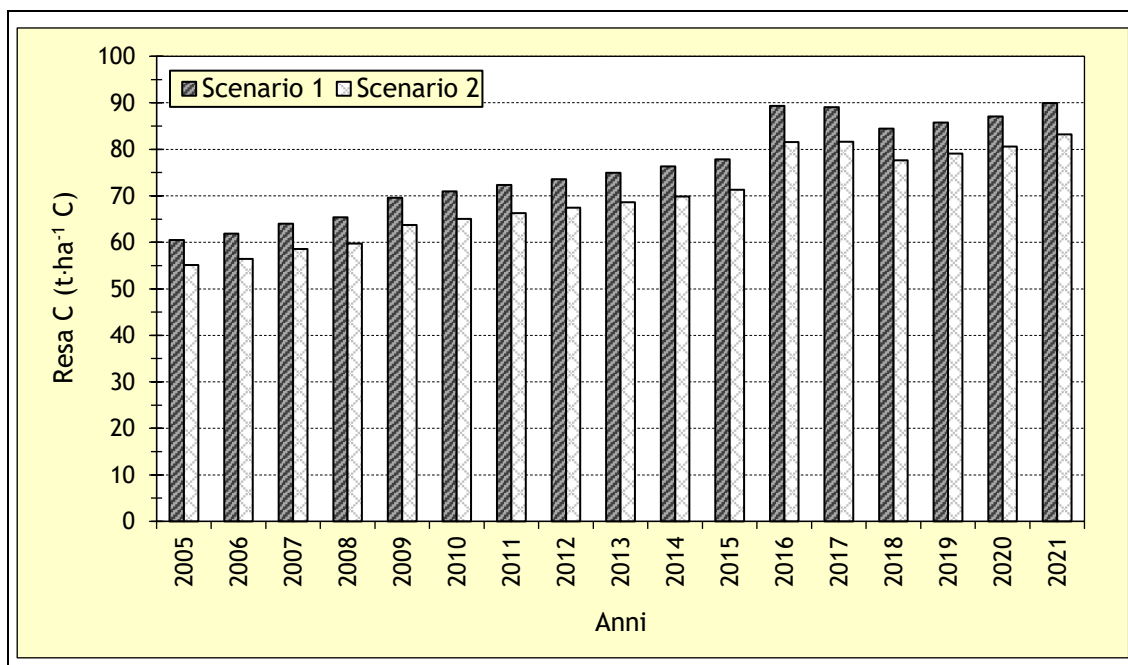


Figura 4.26 - Resa media ponderata di C per Scenario 1 (k_7 costante) e Scenario 2 (k_7 variabile).

Relativamente alla resa di **residui epigei potenzialmente producibili** invece, l'impiego di valori variabili del parametro k_7 causa una diminuzione mediamente compresa tra il **43,9% (2011)** e il **53,5% (2009)** (Figura 4.27).

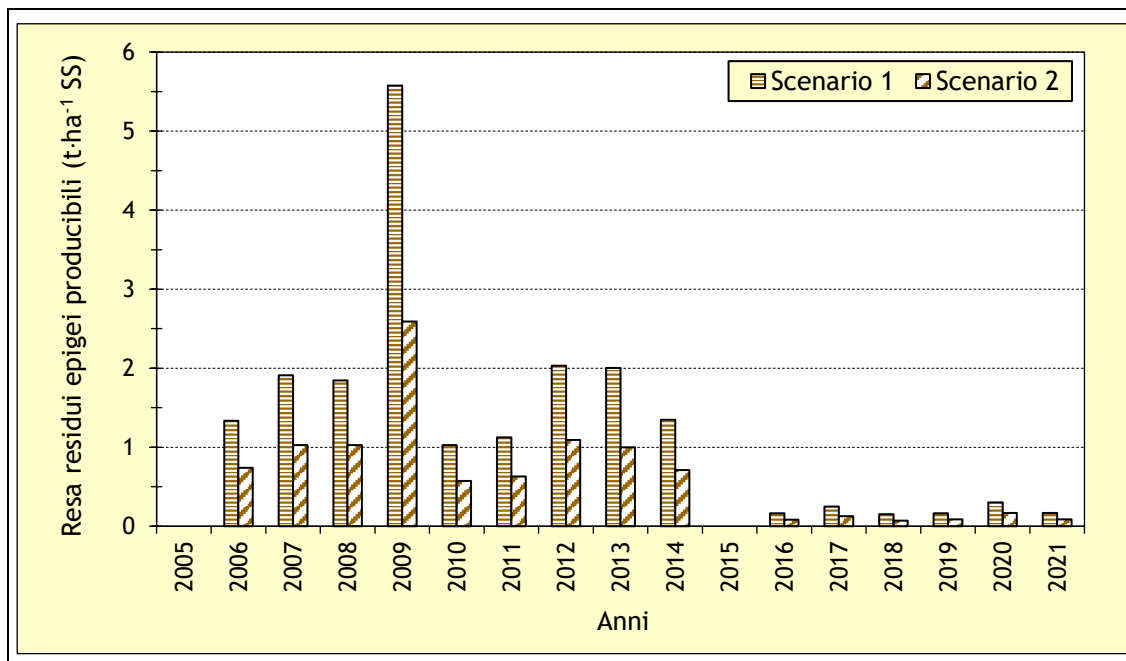


Figura 4.27 - Resa media ponderata di residui epigei per Scenario 1 (k_7 costante) e Scenario 2 (k_7 variabile).

I risultati ottenuti possono essere impiegati per la definizione di future pratiche **sostenibili** di gestione selvicolturale. Infatti, lo *stock* di C presente in un bosco e la sua variazione nel tempo (cioè il *sink*) dipendono fortemente dalle pratiche di gestione selvicolturale, e in primo luogo dai **prelievi legnosi**. In tale contesto, la gestione forestale a **scala di particella** può avere diversi **obiettivi**: **massimizzazione del *sink* di C**, **massimizzazione dello *stock***, o aumento della **resilienza e vitalità** dell'ecosistema.

Il **primo obiettivo** può essere raggiunto incrementando i prelievi legnosi: oltre a rendere disponibile una quantità maggiore di biomassa lungo la filiera, ciò determina una diminuzione istantanea della biomassa in bosco e dunque un aumento dell'incremento annuo con conseguente aumento del *sink*. Il **secondo obiettivo** può essere raggiunto, al contrario, riducendo i prelievi e aumentando il periodo di tempo tra i tagli a maturità del soprassuolo; ciò determina un aumento della biomassa e, contemporaneamente, una diminuzione dell'incremento annuo. Il **terzo obiettivo**, infine, può essere raggiunto applicando una **gestione forestale adattativa**, principalmente aumentando la **biodiversità**. Ciò può essere fatto mantenendo adeguate quantità di **sostanza organica morta**, che rappresenta un *habitat* fondamentale per numerose specie di uccelli e mammiferi. Nell'Elaborato, la massa di sostanza organica morta è stata quantificata assumendo che tutti i residui potenzialmente producibili

rimangano in bosco. Anche se in alcuni casi i residui sono prelevati (principalmente per destinazione energetica), tale assunzione è giustificata in quanto la sostanza organica morta riduce l'erosione del terreno e contribuisce al ricircolo di nutrienti. Attualmente i PAF non riportano informazioni sulla massa di legno morto presente nelle particelle forestali. L'inclusione di tali informazioni, invece, sarebbe importante per aumentare il livello di dettaglio dei dati raccolti e calcolare le masse di legno e C con maggiore accuratezza.

5. CONCLUSIONI

I PAF sono strumenti operativi mediante i quali le foreste sono gestite a livello locale, definendo - in particolare - gli interventi selvicolturali per la gestione razionale della “risorsa legno”. Le informazioni contenute nei PAF, spesso trascurate, possono rappresentare il punto di partenza per la quantificazione della massa (*stock*) di Carbonio (C) contenuto nei boschi che, ai fini della mitigazione degli impatti climatici, rappresenta uno tra i più importanti servizi ecosistemici forniti dalle foreste.

La **prima attività** condotta nel presente Elaborato Finale ha riguardato la **raccolta di dati assestamentali** e dati relativi al **volume cormometrico annualmente prelevato** (periodo: 2005-2021) per **493 particelle forestali** relative a **7 PAF** della Media e Alta Valtellina (superficie forestale complessiva: **10543 ha circa**).

Tali dati sono stati quindi organizzati in un **Database 1 informatizzato** (“Scheda Rilievo”) predisposto con l’obiettivo di **uniformare**, per tutte le particelle analizzate, le informazioni disponibili nei PAF e nelle istanze di taglio, rendendole **facilmente accessibili** per la visualizzazione, la modifica e l’aggiornamento di anno in anno.

I dati precedentemente raccolti e organizzati nel Database 1 sono stati successivamente elaborati (seconda attività) predisponendo un **Database 2**, denominato “**Scheda Risultati**”, che restituisce **risultati aggregati** a livello sia di singolo Comune, sia di intero territorio analizzato.

L’inclusione, nel medesimo Database, di informazioni solitamente disgiunte (i dati assestamentali e i dati relativi ai prelievi effettuati, appunto) e la loro successiva elaborazione consentono senza dubbio di **velocizzare e migliorare** l’analisi per singola particella rispetto alla consultazione di PAF e altri archivi cartacei o digitali in formato .pdf., dando la possibilità di disporre di **risultati aggregati prontamente disponibili**.

La terza e ultima attività ha riguardato l’inserimento dei dati di input del Database 1 nel modello di calcolo WOCAS v2, che quantifica le masse di legno ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ SS) e C ($t \cdot \text{anno}^{-1}$ C) per ciascuna particella forestale dall’anno di entrata in vigore del PAF fino a un anno di riferimento. Tali masse sono ripartite nei seguenti *pools*: (i) biomassa legnosa epigea, (ii) biomassa legnosa ipogea e (iii) sostanza organica morta. Nell’Elaborato, le masse di legno e C sono state quantificate per il **periodo 2005-2021**.

Una **criticità** che si è riscontrata ha riguardato il fatto che per **25 prelievi**, tutti ascrivibili ai PAF della **Comunità Montana Valtellina di Tirano**, l’anno di esecuzione non era disponibile. Pertanto, la massa cormometrica prelevata ad essi associata (7168 t SS, 35% circa della massa totale prelevata) non è stata inclusa nel modello di calcolo WOCAS v2. L’inclusione di tale massa avrebbe senza dubbio portato a **risultati più attendibili**. Pertanto, per evitare di perdere

informazioni importanti in eventuali future analisi, si suggerisce di associare sempre a ciascun prelievo la data di esecuzione.

Per ciascuna particella sono stati analizzati **due Scenari (S1 e S2)** in base al valore assunto dal parametro **“fattore di espansione della biomassa”**: (i) S1: valore costante per ciascuna specie legnosa, come riportato nell’Inventario Forestale Nazionale e (ii) S2: valore variabile, calcolato per ciascuna particella in base alla massa cormometrica che la caratterizza.

Confrontando i risultati ottenuti nei due Scenari si evince che l’impiego di valori variabili del fattore di espansione della biomassa determina, per i differenti *pools*, una resa di biomassa e - conseguentemente anche di C - dal 7,4% (2020) all’8,8% più bassa rispetto a quella associata all’impiego di valori costanti del parametro. Relativamente ai **residui epigei potenzialmente producibili**, invece, l’impiego di valori variabili causa una resa dal **43,9% al 53,5%** più bassa.

L’attività svolta è **estremamente importante** e ha una **valenza pratica significativa** perché, oltre a **quantificare** per la prima volta la **resa legnosa e il corrispondente stock di C dei boschi di Media e Alta Valtellina per singola particella**, ha dimostrato che il fattore di espansione della biomassa è un parametro chiave, perché a seconda dei valori impiegati si ottengono **variazioni non trascurabili nelle rese** di biomassa e C.

L’**analisi storica** degli **interventi selvicolturali** è fondamentale per analizzare come è stata utilizzata la risorsa locale nel corso del tempo e valutare la sua disponibilità, sia attuale, sia futura. Spesso le analisi della disponibilità di biomassa residuale sono condotte solo sulla base degli interventi selvicolturali pianificati, che non sempre corrispondono a quelli effettuati.

Nel modello di calcolo WOCAS v2 le masse di legno e C sono calcolate attraverso una **metodologia standardizzata** che impiega, come dato principale di partenza, il volume cormometrico lordo; tale dato è sempre reso disponibile dai PAF, e ciò rende possibile l’impiego del modello in tutte le aree forestali per le quali i dati di input richiesti sono disponibili. Ciò è particolarmente importante considerando l’attuale dibattito in corso sul futuro ruolo del settore forestale per raggiungere gli **obiettivi UE-2050** per il cambiamento climatico, ed è anche in linea con l’approccio della **“Smart Climate Forestry”**, che mira ad aumentare la produttività delle foreste e i redditi dei proprietari terrieri aumentando la resilienza ai cambiamenti climatici e riducendo, allo stesso tempo, le concentrazioni di CO₂ e altri gas serra nell’atmosfera (a esempio attraverso incentivi fiscali per la rigenerazione con alberi più resilienti, l’uso del legno invece che di materiali più ambientalmente impattanti, crediti C e altri pagamenti per i servizi ecosistemici).

Allo stesso tempo, però, è importante ricordare che, nonostante in Italia la gestione dei servizi ecosistemici forestali sia tendenzialmente aumentata negli ultimi decenni e raggiunga pienamente gli obiettivi definiti in sede europea, vi è una **scarsa diffusione dei PAF**, i quali

attualmente coprono solo il **19,2% delle superficie forestali nazionali**. Questa criticità causa indubbiamente una **mancaza di dati** a scala locale, e potrebbe **limitare l'applicazione** su larga scala del modello di calcolo. Sarebbe dunque auspicabile che le pubbliche amministrazioni prendessero opportune iniziative a livello sia nazionale, sia regionale, per incrementare la superficie forestale coperta da PAF. Questi ultimi sono infatti essenziali per garantire la fornitura continua di servizi ecosistemici nello spazio e nel tempo, in base alle esigenze della popolazione e ai regolamenti nazionali e internazionali.

BIBLIOGRAFIA

1. Agostini A., Giuntoli J., Boulamanti A. (2014). Carbon accounting of forest bioenergy. Conclusions and recommendations from a critical literature review. Publications Office of the European Union, Luxembourg, Europe, pp. 88. <https://doi:10.2788/29442>
2. Anfodillo T., Pilli R., Salvadori I. (2006). Preliminary analysis on the carbon stock of the Veneto Region forests. Direzione Foreste ed Economia Montana, Regione Veneto, Mestre, pp. 125.
3. Berton M., Chiostrì C., Corona P., Mori P., Pettenella D., Romano R. (2017), Gestire il bosco: una responsabilità sociale. Relazione al Convegno: Le foreste incontrano la politica. AIEL, AISF, Accademia dei Georgofili, Compagnia delle Foreste, CREA, SISEF, TESAF. Roma, 25 ottobre 2017. <http://www.georgofili.info/backoffice/media/handlerObject.ashx?id=4334%7Cn>
4. Canals Revilla G.G., Gutierrez del Olmo E.V., Picos Martin J., Voces Gonzalez R. (2014). Carbon storage in HWPS. Accounting for Spanish particleboard and fiberboard. Forest Systems 23(2): 225-235. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014232-04046>
5. Cherubini F., Bird ND., Cowie A., Jungmeier G., Schlamadinger B., Woess-Gallasch S. (2009). Energy and greenhouse gas based LCA of biofuel and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations. Resources, Conservation and Recycling 53(8): 434-447. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013>
6. Ciccicarese L., Pellegrino P., Pettenella D. (2014). A new principle of the European Union Forest policy: the cascading use of wood products. Italian Journal of Forest and Mountain Environments 69(5): 285-290. <http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2014.5.01>
7. Del Favero R. (2002). Forest typology of Lombardy Region. Ecological framework for the management of Lombardy forests, Cierre, Padova, Italy, pp. 510.
8. EASAC (2017). Multi-functionality and sustainability in the European Union's forests. https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Forests/EASAC_Forests_web_complete.pdf envso ft. 2012. 05. 016
9. ERSAF (2020). Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia.
10. Fang, J.Y.; Chen, A.P.; Zhang, X.Q.; Zhao, S.Q.; Ci, L.J. Calculating Forest biomass changes in China. Science 2002, 296, 1359.
11. Federici S., Vitullo M., Tulipano S., De Lauretis R., Seufert G. (2008). An approach to estimate carbon stocks changes in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case.

- iForest - Biogeosciences and Forestry 1(2): 86-95. <https://doi.org/10.3832/ifer0457-0010086>
12. Gallinaro N. (2004). Boschi di Lombardia, un patrimonio da vivere.
 13. Goodale C.L., Apps M.J., Birdsey R.A., Field C.B., Heath L.S., Houghton R.A., Jenkins J.C., Kohlmaier G.H., Kurz W., Liu S.R., Nabuurs G.-J., Nilsson S., Shvidenko A. (2002). Forest carbon sinks in the northern Hemisphere. *Ecological Applications* 12(3): 891-899. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2002\)012\[0891:FCSITN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[0891:FCSITN]2.0.CO;2)
 14. Grassi G., Pilli R., House J., Federici S., Kurz WA. (2018). Science-based approach for credible accounting of mitigation in managed forests. *Carbon Balance and Management* 13(1):8. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0096-2>
 15. Gregorini G. (2020). Appunti di Assestamento forestale A.A 2020/2021. Parte II Dendroauxologia.
 16. Guo Z, Fang J, Pan Y, Birdsey R. 2010. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: a comparison of three methods. *Forest Ecology and Management* 259(7):1225-1231. <https://doi:10.1016/j.foreco.2009.09.047>
 17. IEA Bioenergy Task 45 (2021). Campaigns questioning the use of woody biomass for energy are missing key facts. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/campaigns-questioning-the-use-of-woody-biomass-for-energy-are-missing-key-facts/>
 18. ISTAT (2014). Utilizzazioni legnose forestali per tipo di bosco e per destinazione. http://agri.istat.it/sag_is_pdwout/jsp/Introduzione.jsp?id=7A
 19. Magnani F., and Raddi S. (2014). Towards an assessment of tree mortality and net annual increments in Italian forests. Which sustainability for the Italian forestry? *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology* 11: 138-148. <https://doi.org/10.3832/efor1235-011>
 20. Marchetti M., Motta R., Pettenella D., Sallustio L., Vacchiano G. (2018). Forests and forest-wood system in Italy: towards a new strategy to address local and global challenges. *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology* 15: 41-50
 21. MIPAAF (2012). Piano della filiera legno 2012-2014: documento di sintesi. Ministero per le Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Roma, pp. 34.
 22. Monserud R.A. (1976). Simulation of forest tree mortality. *Forest Science* 22(4): 438-444. <https://doi.org/10.1093/forestscience/22.4.438>
 23. MSE (2010). Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia (direttiva 2009/28/CE). Ministero dello Sviluppo Economico, Roma, pp. 217.

24. Nabuurs GJ., Arets EJMM., Schelhaas MJ. (2018). Understanding the implications of the EU-LULUCF regulation for the wood supply from EU forests to the EU. *Carbon Balance and Management* 13:18. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0107-3>
25. Nonini L., Fiala M. (2019). Estimation of carbon storage of forest biomass for voluntary carbon markets: preliminary results. *Journal of Forestry Research*. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01074-w>
26. Nonini L., Schillaci C., Fiala M. (2020). Assessment of Forest Biomass and Carbon Stocks at Stand Level Using Site-Specific Primary Data to Support Forest Management. In: Coppola A., Di Renzo G., Altieri G., D'Antonio P. (eds). *Innovative Biosystems Engineering for Sustainable Agriculture, Forestry and Food Production. MID-TERM AIIA 2019. Lecture Notes in Civil Engineering* 67, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39299-4_56
27. Norton M., Baldi A., Buda V., Carli B., Cudlin P., Jones M.B., Korhola A., Michalski R., Novo F., Oszlányi J., Duarte Santos F., Schink B., Shepherd J., Vet L., Walloe L., Wijkman A. (2019). Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy. *GCB Bioenergy* 11(11): 1256-1263. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12643>
28. Perone A., Di Benedetto S., Vizzarri M., Lasserre B. (2015). Carbon stock in wood products: implications for carbon accounting at national and local scale in Italy. *Italian Journal of Forest and Mountain Environments* 70(4): 257-272. <https://doi.org/10.4129/ifm.2015.4.02>
29. Pilli R., Fiorese G., Grassi G. (2015). EU mitigation potential of harvested wood Products. *Carbon Balance and Management* 10(1): 6. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0016-7>
30. Portovenere S. (2013). Aggiornamento degli aspetti produttivi della Foresta Regionale Val Gerola nell'ambito del Piano di Assestamento Semplificato delle Foreste di Lombardia. Tesi di Diploma universitario in "Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del territorio montano", Università degli Studi di Milano, Facoltà di Agraria.
31. Proh S. (2008). Utilizzazione a fini energetici di legno cippato da fustaia in un comune della provincia di Sondrio. Tesi di Diploma universitario in "Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del territorio montano", Università degli Studi di Milano, Facoltà di Agraria.
32. Quadri L. (2019). Piani di assestamento (1984-2016) in Valle Camonica: Analisi dei tagli effettuati nelle particelle forestali pubbliche. Tesi di Diploma universitario in "Scienze e tecnologie agrarie", Università degli Studi di Milano, Facoltà di Agraria.
33. Romano R. M. (2015). Gestione attiva del bosco e servizi ecosistemici. In: *Biomasse legnose: petrolio verde per il teleriscaldamento italiano*. Sondrio (SO): Ramponi arti grafiche Srl, pp: 55-63. ISBN:9788890580727.

34. Routa J., Kellomäki S., Kilpeläinen A., Peltola H., Strandman H. (2011). Effects of forest management on the carbon dioxide emissions of wood energy in integrated production of timber and energy biomass. *GCB Bioenergy* 3(6): 483-497. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01106.x>
35. Soimakallio S., Brandão M., Ekvall T., Cowie A., Finnveden G., Erlandsson M., Koponen K., Karlsson P-E. (2016). On the validity of natural regeneration in determination of land-use baseline. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 448-450. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1032-x>
36. Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, Muukkonen P, Lehtonen A, Weiss P. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*. 126(2):197-207. <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0125-7>
37. Spinelli R, Nati C, Magagnotti N (2007) Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croat J for Eng* 28(1):1-9
38. TEEB (2010). Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB, pp. 39. http://nbsapforum.net/sites/default/files/Mainstreaming%20the%20Economics%20of%20Nature_%20TEEB%20.pdf
39. Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. (2009). Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management* 257(3): 1004-1013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.002>
40. UNECE/FAO (2011). State of Europe's forests 2011. Status and trends in sustainable forest management in Europe. Forest Europe, UNECE/FAO, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Oslo, Norway, pp. 344. https://www.foresteurope.org/documentos/State_of_Europes_Forests_2011_Report_Revised_November_2011.pdf.
41. UNFCCC (1992) The United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
42. Zambelli P, Lora C, Spinelli R, Tattoni C, Vitti A, Zatelli P, Ciolli M (2012) A GIS decision support system for regional forest management assess biomass availability for renewable energy production. *Environ Modell Softw* 38:203-213. <https://doi.org/10.1016/j>

RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo elaborato finale mi accorgo che le persone che devo ringraziare sono veramente tante.

Innanzitutto, mi pare doveroso ringraziare gli enti della Comunità Montana di Tirano e il Consorzio Forestale Alta Valtellina per avermi permesso di usufruire dei loro documenti.

Grazie al Professor Marco Fiala per l'opportunità che mi è stata data, grazie al Dottor Luca Nonini, nonché correlatore della tesi, per il numerosissimo tempo che ha dedicato a questo progetto, per gli insegnamenti dati e per l'ampia disponibilità.

Ringrazio mia madre per essermi sempre stata vicina in qualsiasi momento, di avermi insegnato che dai momenti più bui ci si rialza sempre e di avermi dato la forza anche quando gli esami non portavano gli esiti sperati e le giornate di studio sembravano infinite.

Grazie alla mia fidanzata Elisa per aver sempre creduto in me, per avermi trasmesso la sua determinazione e per essermi vicina ogni giorno.

Mi sento in dovere di ringraziare il mio coinquilino Paolo per la compagnia e per la pazienza avuta nel cercare di spiegarmi tutte quelle materie in cui avevo grosse lacune. Grazie a tutti quegli amici che ho conosciuto in questi tre anni passati a Edolo, in particolare Erica, Martina, Marco e Mattia.

Grazie ad Alessandra per essere quell'amica su cui si può sempre contare.

Grazie a tutti gli amici e parenti che in questi tre anni mi hanno dato sostegno e si sono preoccupati per me, in particolare: Fabio, Patrizia, Nadia, Marina, zio Mauro e zia Delia, zia Cinzia, Greta, Marco, Benedetta, Davide, Marco, Kristel, Elena, Marco, Nicola, Christian, Angela, Giulia, Cristian, Simone, Camilla, Lorenzo, Stefano, Andrea e Simone.

Ringrazio le mie nonne Irene e Clotilde e i miei zii "Tigli" per i numerosi "te racomande" detti ogni lunedì mattina prima di partire per Edolo. Grazie zia Angela e zio Bepi per l'affetto dimostrato.

Grazie alla Professoressa Tezza e alla Professoressa Rottoli, che dall'istituto alberghiero mi hanno sempre trasmesso tramite le loro lezioni la voglia di conoscere, di imparare e di incamminarmi in questo percorso.

Grazie a Vanna e Mario che in questi tre anni a Edolo mi hanno ospitato nella loro casa.

Infine, il grazie più importante va a loro, a mio padre e a mio nonno, che anche da così lontano sono sempre stati lì con me nella tasca dei miei jeans in ogni singolo esame; grazie per avermi fatto capire l'importanza del lavoro e della fatica.