



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE  
E AMBIENTALI - PRODUZIONE,  
TERRITORIO, AGROENERGIA

*Quantificazione di biomassa e carbonio in particelle forestali e stima  
della ramaglia prelevabile per fini energetici in Valle Camonica:  
un approccio modellistico*

Dr. Luca Nonini, Prof. Marco Fiala  
[luca.nonini@unimi.it](mailto:luca.nonini@unimi.it); [marco.fiala@unimi.it](mailto:marco.fiala@unimi.it)

*Università della Montagna, Edolo (BS)  
venerdì 19 novembre 2021.*

- ❖ Stima massa legno e carbonio (C) forestale fondamentale per pianificazione e gestione (livello locale) e mitigazione cambiamento climatico;
- ❖ modelli di stima disponibili ma non sempre adeguati per gestione forestale → dati non disponibili;
- ❖ massa legno e C molto spesso stimati solo per biomassa epigea;
- ❖ biomassa residuale influenza notevolmente dinamica C ma sua disponibilità generalmente non considerata in modelli di dinamica del C forestale.

## SOLUZIONE

- ❖ Stima massa di legno e C forestale sulla base dei dati da Piani di Assestamento (PAF) e in differenti «comparti» ecosistemici;
- ❖ quantificazione biomassa residuale prelevabile .



## OBIETTIVO

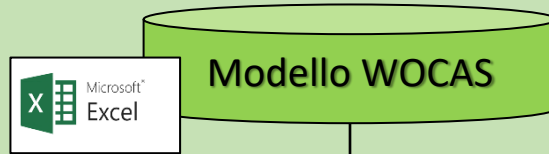
- ❖ Modello generalizzato per stima massa di legno e C e biomassa potenzialmente prelevabile per energia (particella forestale) in base a dati da PAF,
- ❖ risultati derivanti da applicazione modello in Valle Camonica.

## BENEFICI (livello locale)

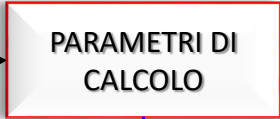
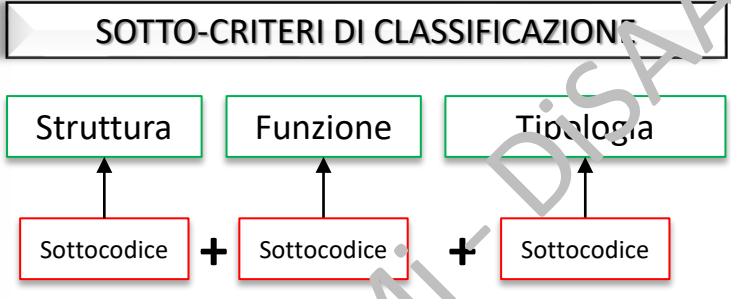
Amministrazioni, Enti e operatori di filiera (consorzi, imprese boschive):

- ❖ Aggiornamento PAF, previsioni/prescrizioni → pianificazione e gestione forestale;
- ❖ Valutazione contributo biomassa residuale in filiera legno-energia locale → pianificazione strategie intervento e ottimizzazione operazioni raccolta (→ *low carbon economy*).

MODELLO WOCAS: STRUTTURA GENERALE



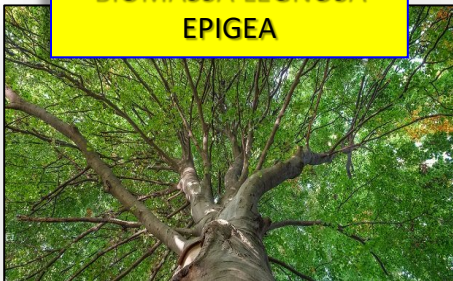
Primo foglio di lavoro: selezione parametri



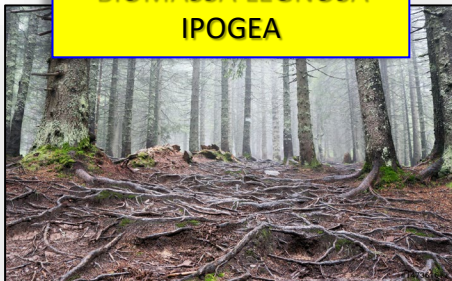
Approccio «gain-loss» (Linee Guida IPCC)

Secondo foglio di lavoro: calcolo massa legno e C

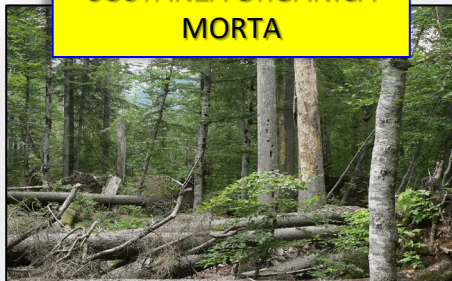
BIOMASSA LEGNOSA EPIGEA



BIOMASSA LEGNOSA IPOGEA



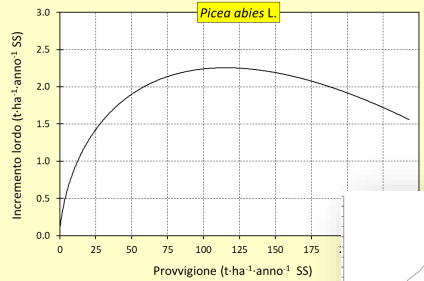
SOSTANZA ORGANICA MORTA



## MASSA LEGNO E CARBONIO: APPROCCIO GENERALE DI CALCOLO (SINGOLA PARTICELLA)

Per ciascuna particella dall'anno di entrata in vigore del P.A.F. fino a un anno di riferimento.

### CRESCITA (INCREMENTO)



### PERDITE



**AUTO-DIRADAMENTO**  
Non disponibile da P.A.F.



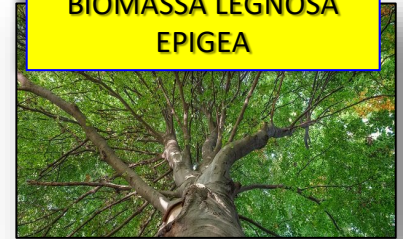
**DISTURBI NATURALI**  
Eventualmente disponibile da P.A.F. (salvage logging)



**PRELIEVI EFFETTUATI**  
Disponibile da P.A.F.

Massa annuale legno e C

**BIOMASSA LEGNOSA EPIGEA**



**BIOMASSA LEGNOSA IPOGEA**



**SOSTANZA ORGANICA MORTA**



STIMA DELL'INCREMENTO ANNUALE

INCREMENTO  
(t·anno<sup>-1</sup> SS)

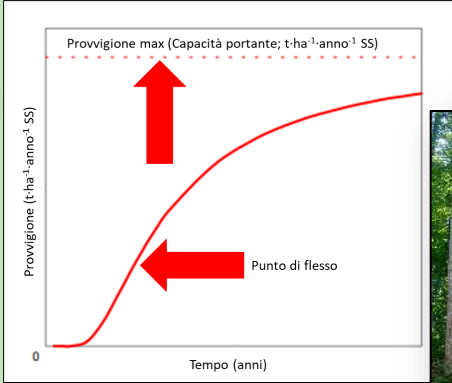
Funzione di  
Richards

$$P_n = k_2 \cdot [1 - e^{(k_3 - k_4 \cdot t)}]^{-1/k_5} \cdot A_F$$

- $P_n$  = provvigione (massa cormometrica) all'inizio dell'anno «n» (t·ha<sup>-1</sup>·anno<sup>-1</sup> SS);
- $k_2$  = provvigione massima (capacità portante; t·ha<sup>-1</sup>·anno<sup>-1</sup> SS);  $k_2 > 0$ ;
- $k_3$  = parametro che permette di variare il punto la provvigione è uguale alla provvigione massima (adimensionale);
- $k_4$  = tasso di crescita relativo (tasso di accumulo di nuova SS per unità di SS esistente; anni<sup>-1</sup>);  $k_4 > 0$ ;
- $t$  = tempo (anni);
- $k_5$  = parametro di forma che permette al punto di flesso di verificarsi per qualsiasi valore della provvigione compreso tra il min e il max (adimensionale);  $-1 \leq k_5 \leq \infty$ ;  $k_5 \neq 0$ ;
- $A_F$  = area forestale della particella (ha);
- $k_6$  = incremento della particella da anno 0 ad anno 1 (t·ha<sup>-1</sup>·anno<sup>-1</sup> SS);  $k_6 > 0$ ;

**Modificatore** che riduce la provvigione massima al valore corrente al tempo «t» → declino della crescita nel tempo.

Funzione non lineare (andamento sigmoideale):  
Crescita cumulata (lorda) del fusto nel tempo



Incremento indipendente da età  
→ f (provvigione)

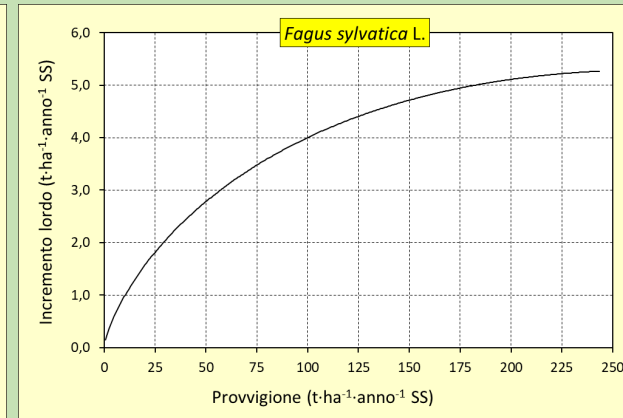
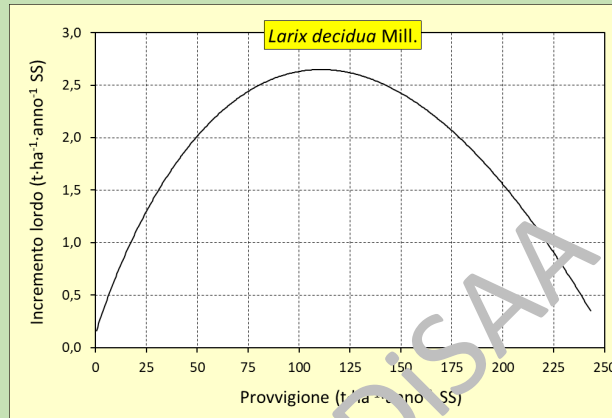
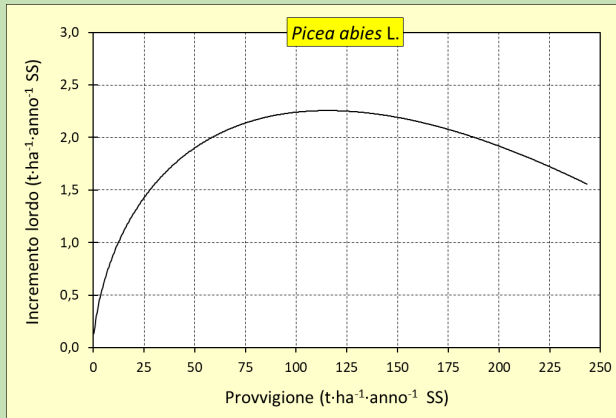
Derivata prima della massa in funzione del tempo = incremento lordo annuale (ICL; t·anno<sup>-1</sup> SS)

$$I_{L_n} = - \frac{k_4 \cdot P_n \cdot (P_n^{k_5} - k_2^{k_5})}{k_2^{k_5} \cdot k_5}$$

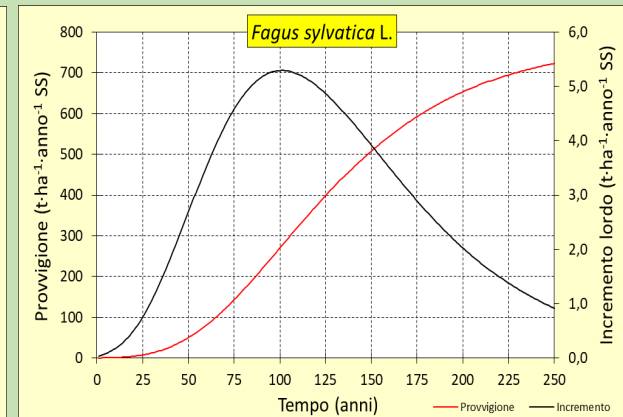
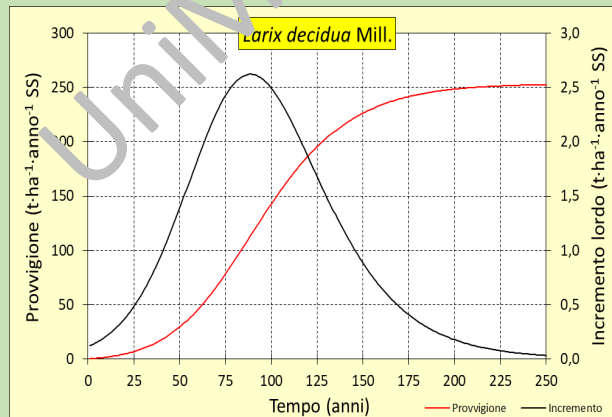
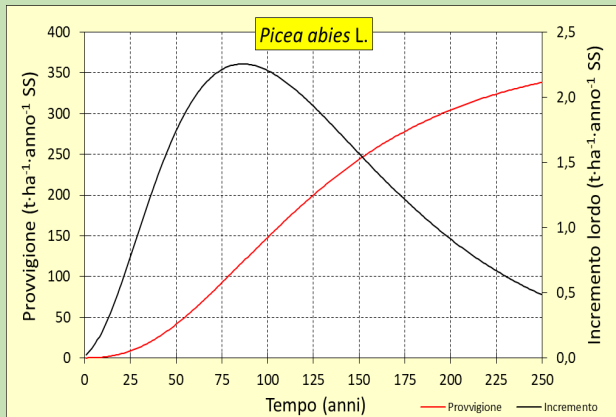
$$= \left\{ \frac{k_4}{k_5} \cdot P_n \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_n}{k_2} \right)^{k_5} \right] + k_6 \right\} \cdot A_F$$

Per ciascuna  
particella per  
ogni anno

## VARIAZIONE DELL'INCREMENTO ANNUALE IN FUNZIONE DELLA PROVVIGIONE



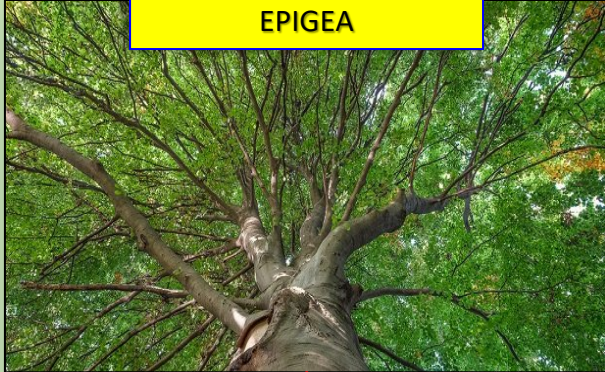
## VARIAZIONE DELL'INCREMENTO ANNUALE E DELLA PROVVIGIONE NEL TEMPO



Parametri di crescita specifici per ciascuna particella calibrati per la Regione Lombardia (tavole alsometriche).

BILANCIO DI MASSA ANNUALE

BIOMASSA LEGNOSA  
EPIGEA



Fattori di espansione della biomassa  
tendenza ramificazione →  
 $f$  (specie, provvigione particella, condizioni  
ambientali e modalità di gestione).

Massa fusto + rami e cimale; foglie  
escluse.

BIOMASSA LEGNOSA  
IPOGEA



Rapporto provvigione/radici grosse  
allocazione fotosintetati → valori costanti  
per singola particella  
 $f$  (specie, forma di governo).

Massa radici grosse ( $\varnothing \geq 2$  mm);  
radici fini ( $\varnothing < 2$  mm) escluse.

SOSTANZA ORGANICA  
MORTA



Bilancio di massa specifico  
INPUT: disturbi naturali, auto-diradamento,  
biomassa residuale lasciata in foresta;  
OUTPUT: decomposizione.

Legno morto in piedi e a terra ( $\varnothing \geq$   
10 cm) + lettiera  $\varnothing < 10$  cm).

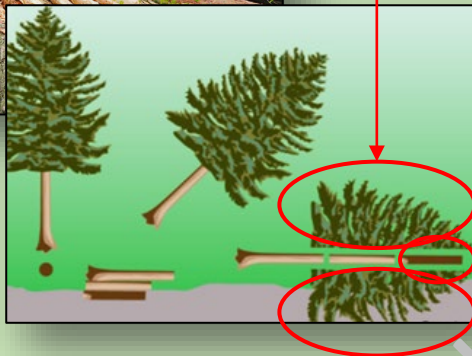
## BIOMASSA RESIDUALE PRELEVABILE PER FINI ENERGETICI: APPROCCIO GENERALE

Per ciascuna particella: indice di utilizzazione (IU) biomassa residuale potenzialmente producibile ( $m_{PRON}$ ; t·anno<sup>-1</sup> SS) da prelievi di fusto.

6 parametri tecnici



Ramaglia + cimale



Livello	Valore empirico
Nulla	0,00
Basso	0,25
Medio	0,50
Alto	0,75
Massimo	1,00

N.	Parametro tecnico	Categoria	Valore Categoria ( $v_{CAT}$ ) e livello qualitativo	Peso parametro ( $p_{PAR}$ )
1	Funzione Prevalente	Protettiva Turistico-ricreativa Altro Produttiva	0,00 (nullo) 0,00 (nullo) 0,00 (nullo) 0,75 (alto)	da 0 a 1
2	Forma di governo	Fustaia di conifere Fustaia mista Fustaia di latifoglie Ceduo	0,25 (basso) 0,50 (medio) 0,75 (alto) 1,00 (massimo)	da 0 a 1
3	Metodo di lavoro	Fusto intero Legno corto Pianta intera	0,25 (basso) 0,25 (medio) 1,00 (massimo)	da 0 a 1
4	Accessibilità	Insufficiente (classe IV) Bassa (classe III) Medio-alta (classe II) Massima (classe I)	0,00 (nullo) 0,25 (basso) 0,75 (alto) 1,00 (massimo)	da 0 a 1
5	Transitabilità	Medio-bassa (classi III e IV) Medio-alta (classi I e II)	0,25 (basso) 0,75 (alto)	da 0 a 1
6	Domanda di biocombustibili	Ridotta Buona Consistente	0,25 (basso) 0,50 (medio) 1,00 (massimo)	da 0 a 1



BIOMASSA RESIDUALE PRELEVABILE PER FINI ENERGETICI: APPROCCIO GENERALE

$$vp_{P\_m} = v_{CAT} \cdot p_{P\_m}$$

$$IU = \sum_{m \rightarrow 1}^6 vp_{P\_m}$$

$$m_{PREn} = m_{PROn} \cdot IU$$

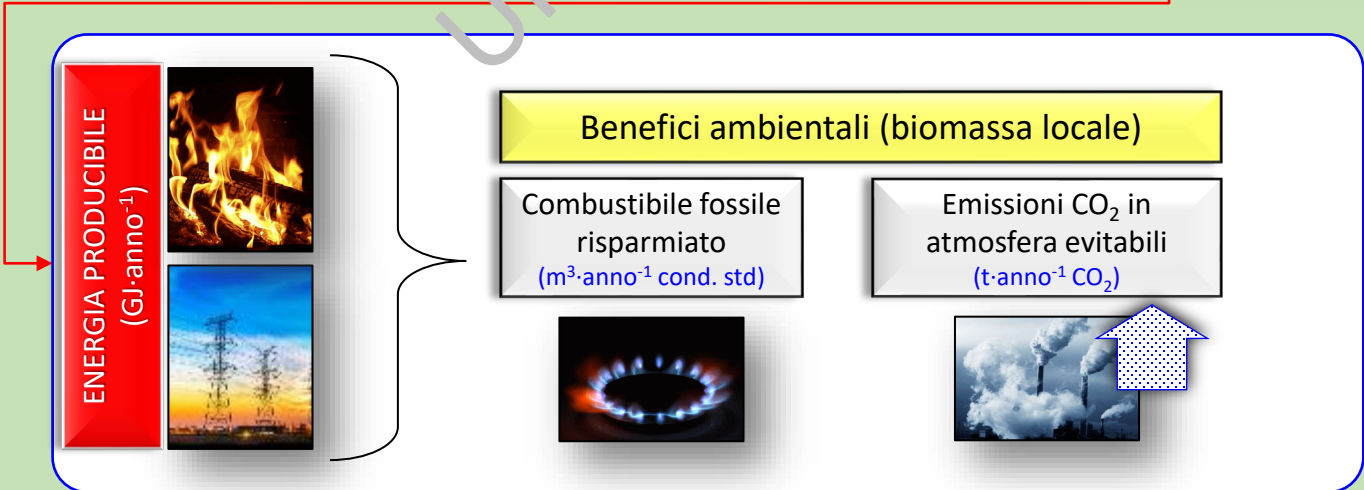
Valore pesato parametro

Valore categoria parametro

Peso parametro

LIVELLO TERRITORIALE

Impianto TLR/cogenerazione centralizzato



MASSA LEGNO E CARBONIO



INFORMAZIONE PARTICELLE

Assessment della gestione forestale di Comparto di legno Torino

**CATASTO PIANI DI ASSESTAMENTO (COMUNITA' MONTANA)**

Microsoft Access

M\_MENU\_GEN

**CPA 2.0**

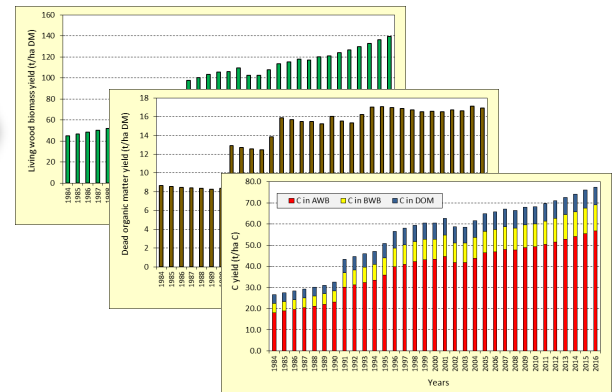
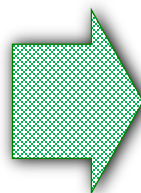
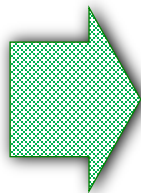
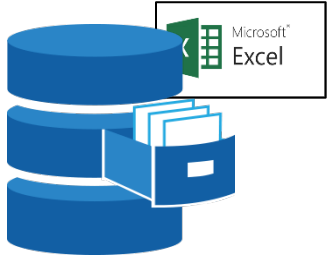
INIZIALIZZA E AGGIORNA I DATI

INSERISCI NUOVI DATI

GESTISCI PIANI D'ASSESTAMENTO

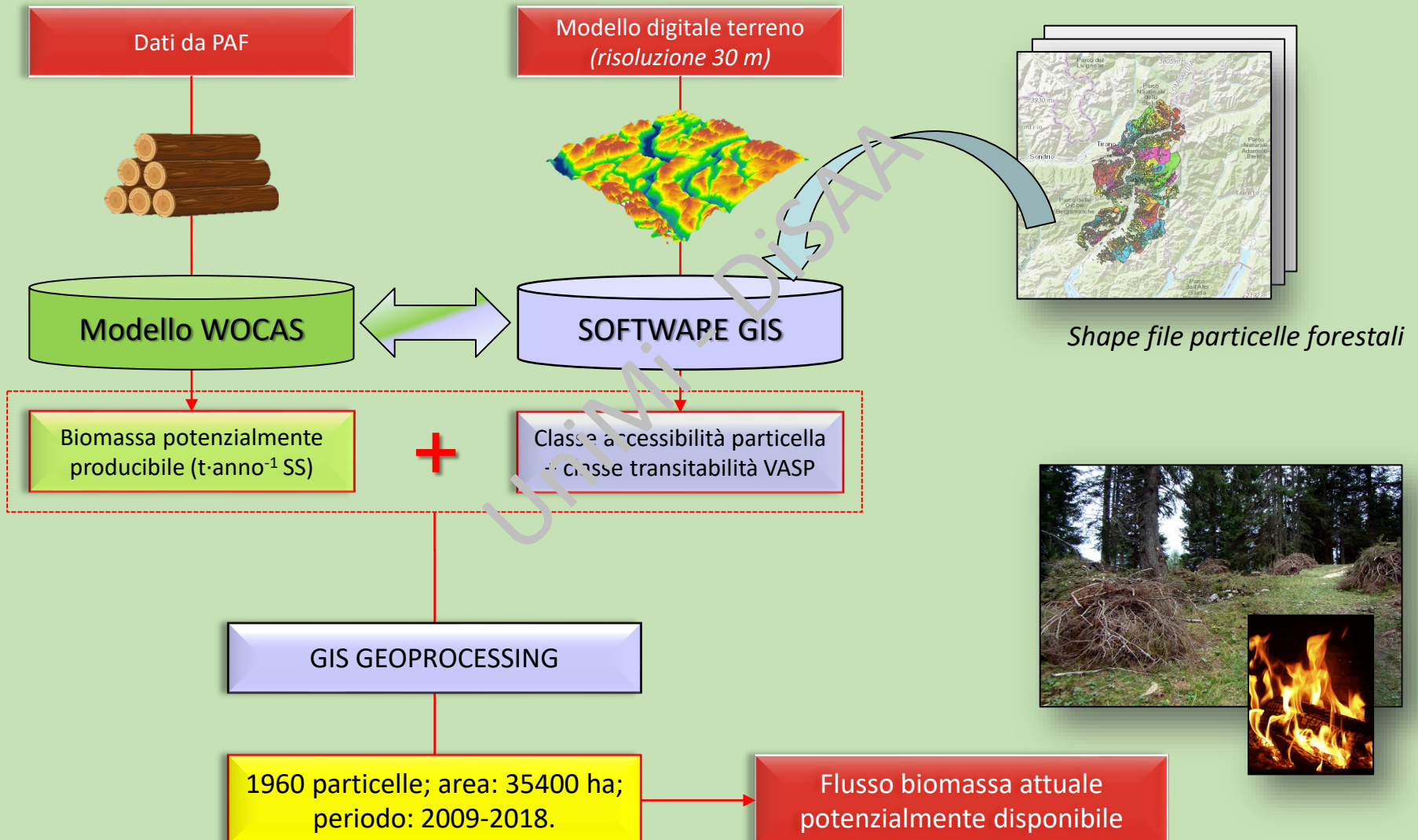
ESTRAZIONE DATI ED ELABORAZIONE

Calcolo massa annuale legno e C

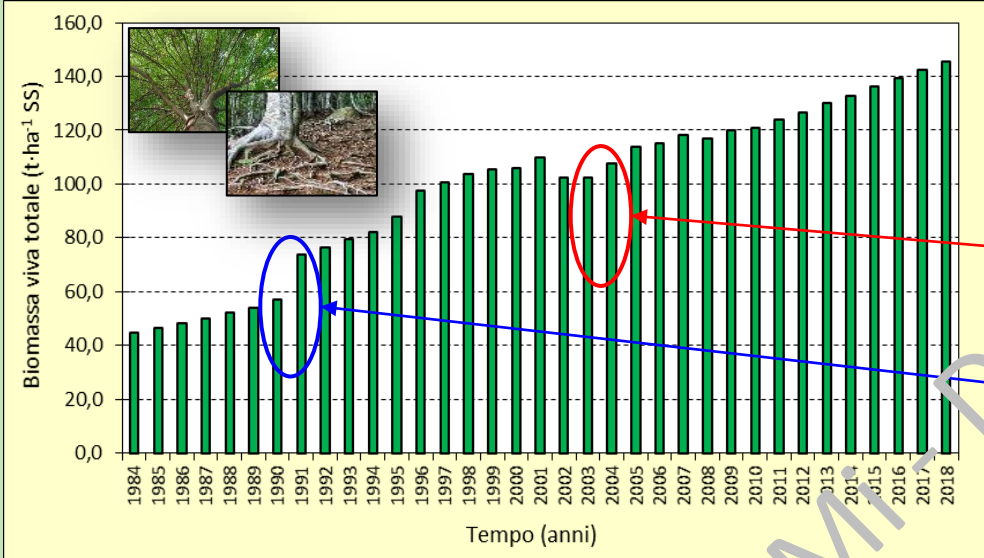


45 PAF (2019 particelle; area = 37000 ha; periodo: 1984-2018)

## BIOMASSA RESIDUALE PRELEVABILE PER FINI ENERGETICI



MASSA MEDIA PONDERATA DI LEGNO (1984-2018) – LIVELLO TERRITORIALE



**AUMENTO MASSA UNITARIA**

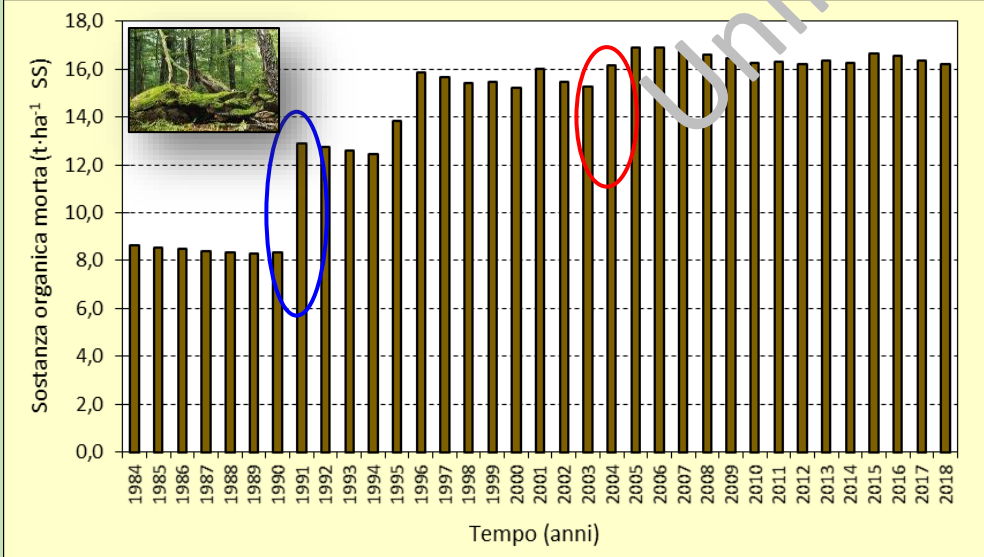
1. Incremento particelle gestite
2. Incremento netto > prelievi (tasso estrazione < 1)
3. Attivazione nuovi PAF (incremento nuove particelle)

Inclusione particelle con elevata area ma poca biomassa; aumento massa tagliata in particelle gestite; tasso aumento area > tasso incremento biomassa

Inclusione particelle con elevata biomassa e elevata area  
tasso incremento biomassa > tasso aumento area

min: 44,72 ± 44,42 t·ha<sup>-1</sup> SS (1984)  
81,2% biomassa epigea;  
18,8% biomassa ipogea.

max: 145,49 ± 70,76 t·ha<sup>-1</sup> SS (2018)  
82,1% biomassa epigea;  
17,9% biomassa ipogea.

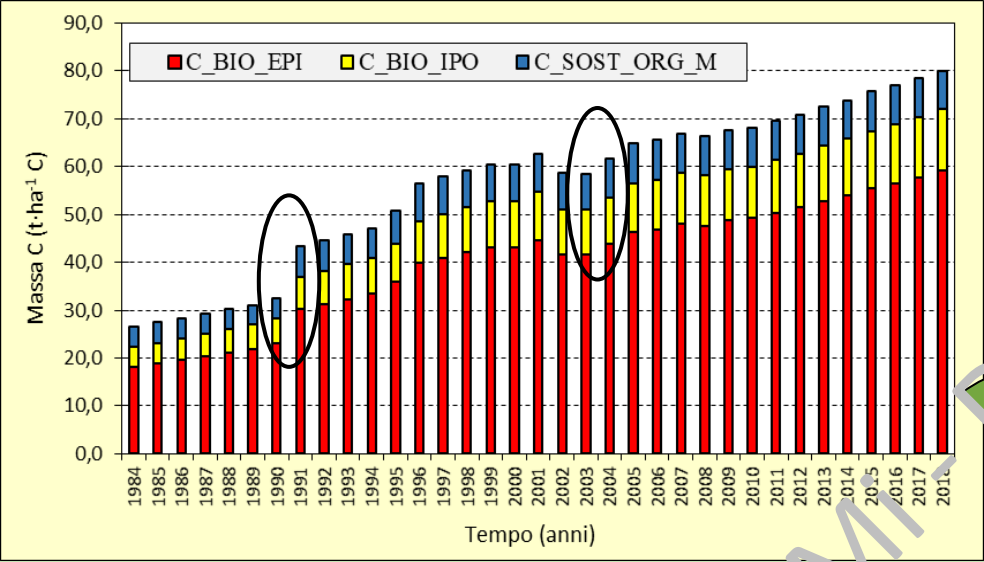


min: 8,28 ± 7,79 t·ha<sup>-1</sup> SS (1989)

max: 16,90 ± 12,08 t·ha<sup>-1</sup> SS (2006)

Elevata deviazione standard: particelle con elevata area ma bassa biomassa e particelle con bassa area ma elevata biomassa.

MASSA MEDIA PONDERATA DI CARBONIO (1984-2018) – LIVELLO TERRITORIALE



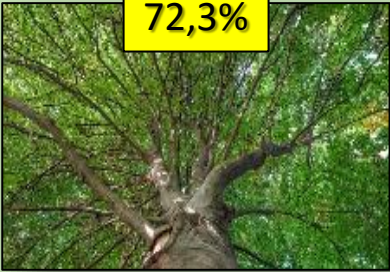
Per ciascun anno massa C in un pool:  
*f* (crescita e perdite nella particella)  
→ Trasferimento C tra pool

$$\text{Massa C} = C_{\text{BIO\_EPI}} + C_{\text{BIO\_IPO}} + C_{\text{SOST\_ORG\_M}}$$

min: 26,53 ± 26,80 t·ha<sup>-1</sup> C (1984)

max: 80,05 ± 40,01 t·ha<sup>-1</sup> C (2018)

Massa C media complessiva pesata (1984-2018) = 67,48 t·ha<sup>-1</sup> C



72,3%

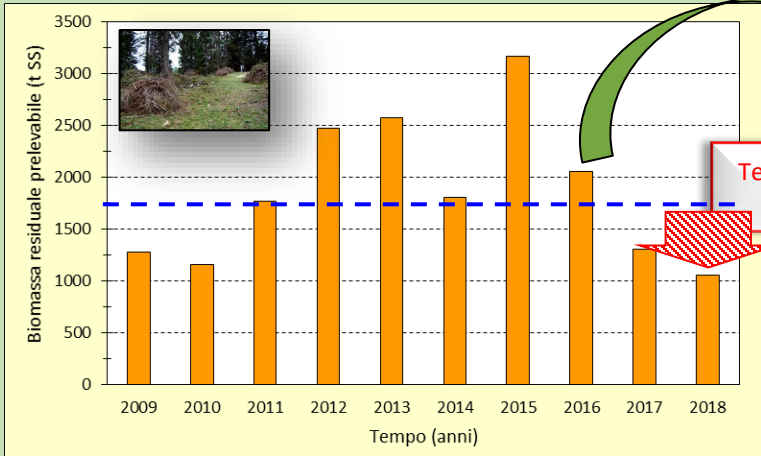


15,9%



11,8%

**BIOMASSA RESIDUALE PRELEVABILE PER FINI ENERGETICI**

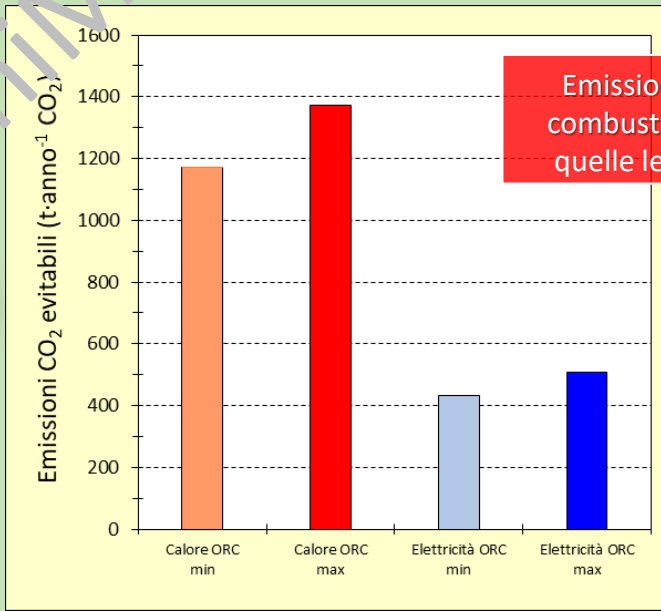
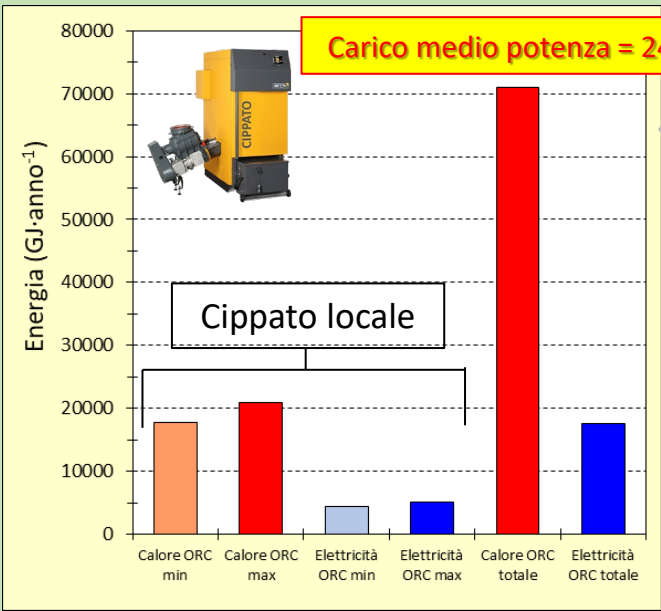


Flusso annuale biomassa residuale prelevabile:  
**Valore medio 2009-2018:  $1.86 \cdot 10^3 \pm 7.01 \cdot 10^2 \text{ t}\cdot\text{anno}^{-1} \text{ SS}$**

- ❖ Gestione sostenibile;
- ❖ Periodo di tempo limitato;
- ❖ foreste simili caratteristiche in termini di volume totale, produttività media e modalità di gestione.

**IMPIANTO TLR PONTE DI LEGNO**

**Energia potenzialmente producibile vs energia prodotta e emissioni CO<sub>2</sub> evitabili (unità ORC; anno rif.: 2019)**



Emissioni riferite al processo di combustione non comprensive di quelle legate a operatività filiera



## CONCLUSIONI

- ❖ Contributo sviluppo metodi per coniugare gestione forestale tradizionale con sfide cambiamenti climatici;
- ❖ approccio bottom-up innovativo applicabile a qualsiasi area forestale gestita da PAF (→ obiettivi EU-2050; «climate smart forestry»);
- ❖ massa annuale legno e C per singola particella e in differenti comparti ecosistemici;
- ❖ biomassa residuale potenzialmente prelevabile  $f$  (valori e peso parametri);
- ❖ diradamenti fustaie/fusti con caratteristiche scadenti → ulteriore fonte biomassa residuale;
- ❖ primo impiego dati PAF Valle Camonica in modello di calcolo «management-oriented»;
- ❖ emissioni evitabili CO<sub>2</sub> → combustione finale.

...IN FASE DI SVOLGIMENTO..

- ❖ Impatto tempesta Vaia su stoccaggio C e biomassa residuale disponibile;
- ❖ previsioni medio-lungo periodo → scenari gestionali;
- ❖ applicazione WOCAS in foreste di Valtellina.



Unimi - DISAA

*Grazie per l'attenzione*