

Biomassa residua e modellizzazione del combustibile a seguito di cantieri forestali di recupero schianti

Introduzione

Tra il 28 e il 30 ottobre 2018 ampie zone delle Alpi orientali sono state interessate da venti che hanno superato i 200 km/h e hanno provocato gravi danni alle foreste, in particolare della Lombardia, del Veneto, del Trentino-Alto Adige e del Friuli Venezia-Giulia. In queste regioni l'evento ha provocato l'abbattimento di almeno 9,5 Mm³ di legname commercializzabile (PILLI *et al.*, 2021). Nella sola Provincia di Trento è stata stimata una superficie schiantata di circa 19500 ettari, di cui 7850 presentavano un danno alla copertura arborea superiore del 90% (PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, 2020).

La soluzione operativa comunemente adottata in seguito a uno schianto da vento consiste nel totale recupero del legname, ovvero interventi di *salvage-logging* (LEVERKUS *et al.*, 2018). Dove la morfologia del sito lo permette, queste operazioni vengono condotte ricorrendo a una elevata meccanizzazione, tramite l'utilizzo di mezzi quali *harvester* e *forwarder*. In condizioni di pendenze più elevate, indicativamente sopra il 50% (HEINIMANN, 2000), l'unico sistema di abbattimento ed allestimento utilizzabile è quello manuale tramite l'uso della motosega ed esbosco effettuato tramite gru a cavo. In seguito alle differenti modalità di intervento si possono generare diversi scenari relativi alla biomassa che viene abbandonata in sito. La necromassa, in queste situazioni costituita soprattutto da residui legnosi rilasciati al

suolo, gioca un ruolo fondamentale all'interno del ciclo dei nutrienti, nel mantenimento della fertilità del suolo, nello stoccaggio di carbonio, nel favorire l'insediamento della rinnovazione forestale e nel livello di biodiversità (VERKERK *et al.*, 2011; BOUGET *et al.*, 2012; MIETTINEN *et al.*, 2014; LARRIEU *et al.*, 2019). A livello quantitativo, BÜTLER e SCHLAEFFER (2004) indicano un valore soglia di necromassa per il mantenimento della biodiversità di 33 m³/ha per le peccete subalpine. Altri autori suggeriscono degli intervalli di valori minimi, ad esempio 20-30 m³/ha in caso di foreste boreali di conifere o di soprassuoli montani misti (MÜLLER, BÜTLER, 2010). Ricercatori svedesi hanno stimato la quantità di legno morto in aree soggette a taglio raso con una media di 42,3 m³/ha in zone a taglio tradizionale e 26 m³/ha in zone interessate da esbosco addizionale di tutti i residui (ERÄJÄÄ *et al.*, 2010). In Svizzera, invece, i primi dati grezzi di aree esboscate soggette a schianti totali o parziali hanno registrato valori tra 45 e 90 m³/ha (CIOLDI *et al.*, 2010). Valori più precisi delle aree colpite dagli uragani Vivian e Lothar e soggette a *salvage-logging* sono di PRIEWASSER *et al.* (2013), dove è stato calcolato un volume medio di biomassa di 74,6 m³/ha. Inoltre, DEL FAVERO *et al.* (2019) sottolineano che nelle zone in cui non vi siano condizioni critiche nei confronti di disturbi da invertebrati saproxilici, è sempre opportuno il rilascio di una quantità di necromassa variabile tra 15 e 40 m³/ha.

Nonostante ciò, il rilascio di ramaglia in bo-

sco può potenzialmente presentare degli aspetti negativi, tra cui l'aumento del rischio d'incendio (DEL FAVERO *et al.*, 2019; GÖMÖRYOVÁ *et al.*, 2008), essendo questi residui combustibile morto che può facilitare l'innescare e sostenere la propagazione del fronte di fiamma. Il pericolo d'incendio nelle aree esboscate dipende dalla quantità di biomassa rilasciata e dalla sua distribuzione spaziale. In genere, minore è la quantità e minore è il pericolo di incendio. Inoltre, il recupero delle piante cadute potenzialmente riduce l'intensità dell'eventuale incendio diminuendo l'altezza di fiamma e limitando i potenziali danni alle chiome degli esemplari rimasti (RIZZOLO, 2020). Per valutare le caratteristiche potenziali di un incendio sono di particolare ausilio i modelli di combustibile, i quali sono composti da parametri che descrivono la vegetazione nei termini richiesti per la soluzione di modelli matematici di previsione del comportamento degli incendi boschivi (LANORTE, LASAPONARA, 2008). Non essendo disponibili modelli locali per l'area alpina per boschi soggetti a schianti, RIZZOLO (2020) ha fornito delle indicazioni sulla scelta dei modelli di combustibile standard utilizzati dal *Forest Service* statunitense più adeguati in queste situazioni, al fine di assumere le decisioni più opportune per un'adeguata gestione delle foreste e delle operazioni di prevenzione e spegnimento degli incendi. Nelle situazioni post-esbosco, però, si presentano delle condizioni di combustibili vivi e morti "ibride", in cui tra lo strato di residui rilasciato dall'esbosco si affermano velocemente sia la vegetazione erbacea che arbustiva. Da ciò ne deriva la necessità di costruire dei nuovi modelli di combustibile, destinati a rappresentare al meglio lo stato delle aree sottoposte a *salvage-logging* per prevedere il loro comportamento nei confronti dell'incendio boschivo. Per una corretta rappresentazione dello stato delle aree è anche necessaria l'indagine di zone esboscate in diversi anni, dato il proseguimento degli interventi di recupero di anno in anno e il contemporaneo sviluppo della copertura erbacea e arbustiva, tenendo cioè conto del tempo trascorso sia dal disturbo che dalle operazioni d'esbosco.

Gli obiettivi di questo lavoro sono: (a) la quantificazione della biomassa residua in termini di valori di carico e volume in aree sog-

gette a diversi sistemi di esbosco; (b) la stima dello strato di combustibile; (c) la modellizzazione dei combustibili per l'implementazione di nuovi modelli applicabili alle aree soggette a recupero schianti riferiti a differenti sistemi di esbosco.

Materiali e metodi

Aree di studio

Le aree di studio selezionate sono peccete altimontane interessate dalla tempesta Vaia, che presentavano schianti totali del soprassuolo forestale e sono in seguito state soggette a interventi di recupero del legname tramite sistema *harvester-forwarder* (HF) o gru a cavo (GC). Queste si collocano all'interno di tre foreste demaniali trentine: la Foresta di Cadino, la Foresta di Paneveggio e quella di San Martino di Castrozza. Le aree di interesse sono sei, codificate per sistema di recupero utilizzato (HF o GC) e per anno di intervento (2019, 2020, 2021). Sono ricomprese in una fascia altitudinale tra i 1500 e i 1800 m s.l.m. circa.

La Foresta di Cadino si trova in sinistra orografica della Val Cadino. Il clima è di tipo alpino endalpico, con una precipitazione media annuale di 1049 mm alla stazione di Val Cadino (964 m s.l.m.) e massimi mensili nel periodo estivo. La temperatura media mensile risulta sotto lo zero nel mese di gennaio, mentre la massima media del mese più caldo-luglio-è di 23,5°C (METEOTRENTINO, 2022). Nella Foresta di Cadino sono localizzate le aree di studio HF 2021 (46°13'46.92" N, 11°23'48.57" E) e HF 2020 (46°13'45.45" N, 11°24'15.58" E). HF 2021 ha una superficie di 4,6 ha e una pendenza media del 23%. HF 2020 ha un'estensione di 30,7 ha e una pendenza media del 25%.

La Foresta di Paneveggio si trova in Val Travignolo. Il clima è di tipo continentale, anche se non accentuato. La distribuzione pluviometrica presenta massimi valori di precipitazione nel periodo estivo e il valore medio annuale ammonta a 1291 mm a Passo Rolle (2012 m s.l.m.), a circa 4 km dai siti di studio, e 1138 mm a Forte Buso (1480 m s.l.m.), a circa 2,5 km dai siti. Dal punto di vista termico si osservano temperature medie annue di 2,7°C

a Passo Rolle e 6,5°C a Forte Buso (AGENZIA PROVINCIALE DELLE FORESTE DEMANIALI TARENTINE, dati non pubblicati). A Paneveggio si trovano le aree di studio HF 2019 (46°18'47.69" N, 11°44'36.96" E) e GC 2020 (46°18'15.91" N, 11°43'49.74" E). HF 2019 copre una superficie di 17,4 ha e ha un'acclività media circa del 35%. GC 2020 ha un'estensione di 10,2 ha e una pendenza media del 26%.

La Foresta di San Martino di Castrozza si trova in Val Cismon, lungo i versanti che circondano l'omonimo abitato. Il clima è di tipo continentale, con un valore di precipitazione media annua di 1440 mm a San Martino di Castrozza (1470 m s.l.m.). La temperatura media annua si attesta sui 5,5°C (AGENZIA PROVINCIALE DELLE FORESTE DEMANIALI TARENTINE, dati non pubblicati). Nella Foresta di San Martino sono collocate le aree GC 2019 (latitudine 46°15'56.23" N, longitudine 11°47'48.75" E) e GC 2021 (46°16'14.92" N, 11°46'58.98" E). GC 2019 si estende per una superficie di 8,5 ha e ha una pendenza media del 34%. GC 2021 presenta un'area di 1,1 ha e una pendenza media circa del 48%.

Metodo di rilievo

Il rilievo della biomassa residua nelle aree di schianto si basa sulla tecnica di intersezione



Figura 1 – Punto centrale di un transetto lungo la linea d'esbosco in un'area harvester-forwarder.

planare di BROWN (1971). Questo metodo implica il conteggio dei residui legnosi che intersecano il piano verticale di campionamento, materializzato in campo da uno spago fissato a

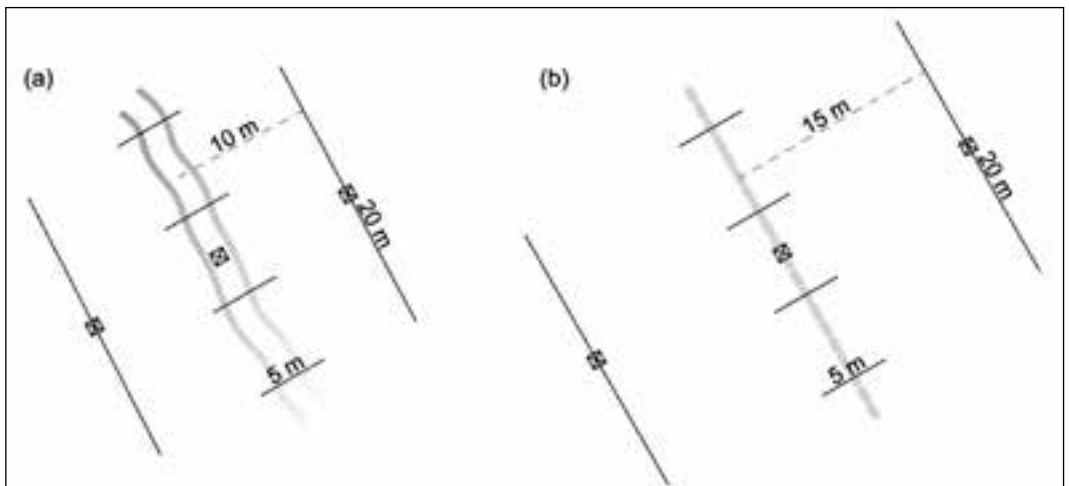


Figura 2 – Localizzazione dei transetti in riferimento alla linea d'esbosco in aree esboscate con sistema harvester-forwarder (a) e gru a cavo (b). Al centro di ogni transetto il punto di georeferenziazione.

terra, il quale determina il transetto di rilievo di lunghezza 20 m. La localizzazione dei transetti in campo si è basata sulla presenza delle linee d'esbosco, essendo le vie lungo le quali il legname viene prelevato dall'area e dove si osservano accumuli di residui (fig. 1). In ogni area si sono realizzati nove transetti, di cui tre lungo linea e sei fuori linea di esbosco. L'esecuzione del rilievo si differenzia nel caso in cui si effettui lungo la linea d'esbosco, articolando il piano di campionamento in 4 sub-transetti da 5 metri l'uno perpendicolari alla direzione d'esbosco, in modo da indagare con maggior dettaglio il corridoio lungo cui le piante vengono prelevate. Inoltre, la distanza dei transetti esterni dalla linea è condizionata dal sistema d'esbosco: 10 m nel caso del sistema di recupero HF, 15 m nel caso di GC (fig. 2).

Lungo i transetti, i detriti legnosi fini, o *fine woody debris* (FWD), sono stati così classificati:

- elementi di *timelag class* 1h (diametro < 6 mm): conteggiati lungo tre intervalli di 1 m nei transetti fuori linea e lungo due sub-transetti lungo linea;
- elementi di *timelag class* 10h (diametro 6-25 mm): conteggiati lungo tre intervalli di 1,2 m nei transetti fuori linea e lungo due sub-transetti lungo linea;
- elementi di *timelag class* 100h (diametro 25-76 mm): conteggiati lungo i 20 m del transetto.

I detriti legnosi grossolani, o *coarse woody debris* (CWD), appartenenti alla *timelag class* 1000h (diametro > 76 mm), sono stati conteggiati lungo i 20 m del transetto. Con *timelag* si intende il tempo di rilassamento del materiale, interpretabile come il tempo per cui un combustibile si stabilisce in equilibrio con l'umidità ambientale. Per eseguire correttamente il campionamento secondo la tecnica di intersezione planare, si esegue il conteggio dei vari elementi utilizzando come strumento un calibro fisso, opportunamente modificato per uno spedito conteggio dei residui (BROWN, 1974).

Il rilievo dello strato di combustibile si articola nella stima dell'altezza e della copertura dei tipi di combustibile in aree di saggio. L'organizzazione spaziale delle aree di saggio è collegata alla disposizione dei transetti nelle aree

di studio, in modo da mantenere omogeneo lo schema di campionamento. Lungo i transetti, i tipi di combustibile sono così campionati:

- lettiera, residui, vegetazione erbacea: altezza e copertura misurate in 3 aree di superficie 1 m², posizionate agli estremi e al centro del transetto;
- arbusti: altezza e copertura misurate in 3 aree di raggio 1 m, posizionate agli estremi e al centro del transetto.

Come altezza si misura l'altezza rappresentativa del combustibile, evitando cioè di considerare singoli elementi che si discostano molto dalla maggioranza del campione. Lungo le piste d'esbosco delle aree HF il sistema di campionamento a tre aree, ricadendo al centro della pista, è duplicato parallelamente in una ormaia, in modo da osservare la diversità di combustibili presente. Per ogni tipo di combustibile, le aree di saggio risultano essere 27 in ogni sito GC, e 36 in ogni area HF.

Elaborazione dati

Per ogni transetto di rilievo, il carico di biomassa residua M per ogni *timelag class* è stato calcolato tramite l'applicazione dell'equazione di BROWN (1974), modificata da RIZZOLO (2016) per adattamento alle condizioni italiane:

$$M = \left(\frac{1,22 \cdot n \cdot d^2 \cdot SG \cdot c \cdot a}{\sum L} \right) \cdot k \cdot 10000$$

dove M è la massa dei residui legnosi della classe di *timelag* considerata [Mg/ha], 1,22 una costante per considerare la disposizione casuale dei pezzi (VAN WAGNER, 1968), n il numero di elementi della classe che intersecano il transetto, d il diametro medio della classe [m], SG la densità relativa, o *specific gravity*, della specie arborea prevalente, c un fattore di conversione della pendenza del transetto, cioè

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\text{pendenza}[\%]}{100} \right)^2}$$

a un fattore di correzione della giacitura che considera il fatto che alcuni elementi possono non giacere orizzontali, pari a 1,13 per le clas-

si dei FWD e a 1 per la classe 1000h, ΣL la somma delle lunghezze nel transetto su cui si è rilevata la classe [m], k un coefficiente di riduzione dovuto alla decomposizione, da WOODALL e MONLEON (2008) pari a 0,8 per i FWD e 0,84 per i CWD, 10000 il fattore di conversione della superficie [m²/ha]. Si ricava poi la biomassa media di ogni *timelag class* per ogni area di studio e successivamente per ogni sistema di recupero schianti. Dividendo la massa M per SG si ottiene il volume di biomassa residua per unità di superficie V [m³/ha].

L'altezza media dello strato di combustibile, o *fuelbed depth*, è intesa come l'altezza media ponderata rispetto alla copertura dei tipi di combustibile presenti:

$$H = \frac{\sum_i (h_i \cdot cop_i)}{\sum_i cop_i}$$

in cui H è l'altezza dello strato di combustibile [cm], h_i l'altezza del i -esimo tipo di combustibile [cm] e cop_i la copertura del i -esimo tipo di combustibile [-].

Per testare l'esistenza di differenze significative tra le distribuzioni di biomassa residua o altezza dello strato di combustibile tra sistemi di recupero schianti e anni d'intervento è stato applicato il test statistico di Mann-Whitney.

Modellizzazione del combustibile

La modellizzazione del combustibile rilevata nelle aree di studio è stata eseguita tramite il programma BehavePlus (versione 6.0.0; FRAMES, 2022), creando un modello per ogni sistema di recupero schianti. Questo strumento permette di pianificare la gestione degli incendi, prevedendo il comportamento del fronte di fiamma nei diversi modelli di combustibile, permettendo inoltre la creazione di modelli personalizzati. La previsione del comportamento del fuoco è restituita come valori di velocità di propagazione (*rate of spread*) e di lunghezza di fiamma (*flame length*). I parametri di input per la costruzione dei modelli di combustibile sono: il carico delle *timelag class* dei FWD, il rapporto superficie-volume del combustibile fine, l'altezza media dello strato di combustibile, l'umidità di estinzione e il potere calorifico dei materiali.

I modelli prodotti sono stati analizzati singolarmente confrontando gli scenari di umidità del combustibile (*moisture scenario*) considerati per range di velocità del vento vantaggiose alla propagazione del fronte di fiamma e per intervalli di pendenze tipiche del sistema di esbosco in analisi. Ulteriore parametro valutato è stata la copertura delle chiome, che nel caso di aree di schianto completo è risultata dello 0%. I *moisture scenario* scelti per l'analisi sono stati: D1L2 per simulare condizioni particolarmente secche dei combustibili; D3L3 come scenario medio; D4L4 per simulare condizioni di alto contenuto di umidità (Appendice I). Lo scenario medio è stato assunto considerando sia le abbondanti precipitazioni che caratterizzano le aree, sia le condizioni di maggiore disidratazione in assenza di copertura arborea. Da una stima visiva della componente erbacea in campo nei mesi di agosto e settembre, essa si presenta essiccata per quasi 1/3 della sua copertura, corrispondente quindi allo scenario L3. Poiché nei mesi più caldi non sono state osservate aree d'erba totalmente secche, si è assunto lo scenario per combustibili vivi L2 per simulare la condizione di umidità più critica, escludendo dunque lo scenario L1. In merito alla velocità del vento si è considerato un intervallo da 10 a 40 km/h (con incrementi di 10); valore massimo dato dalla soglia per cui il vento possa portare ad un aumento della velocità di avanzamento del fronte di fiamma più che proporzionale (BOVIO, 1996). In riferimento all'acclività del versante si è inserito un intervallo del 10-50% per le aree HF e del 10-100% per le aree GC (con incrementi di 10), considerando per le prime che con pendenze tra il 35 e il 50% si possano impiegare mezzi *harvester e skidder* (HEINIMANN, 2000) con un procedimento di esbosco analogo a HF. L'analisi è stata condotta in riferimento ad un solo parametro, fissando il secondo al valore medio tra le aree. Il valore assunto per la velocità del vento è 26,37 km/h, valore medio tra i dati massimi di velocità media giornaliera tra le stazioni prossime ai siti di studio. La pendenza del versante si è stabilita con la media delle pendenze delle zone d'interesse, ovvero circa 32%.

I due modelli implementati nelle aree di studio soggette ai due tipi di intervento di re-

cupero schianti sono stati infine confrontati con alcuni già esistenti riferiti a residui di utilizzazione o schianti, derivati sia dalla serie di ROTHERMEL (1972) che da SCOTT e BURGAN (2005). Ulteriore confronto si è effettuato con modelli di altre categorie di combustibili, selezionando quali più somigliassero per comportamento del fuoco ai modelli di nuova implementazione. La comparazione, e anche la selezione nel secondo caso, sono state quindi eseguite mantenendo fisso lo scenario di umidità medio (D3L3) e applicando gli intervalli di velocità del vento già citati in questo studio e di pendenza del versante del sistema *harvester* e *forwarder*.

Risultati

Carico di biomassa residua

Il carico medio di residui di classe 1h nelle aree HF risulta 1,82 Mg/ha, valore pari a circa metà della media delle aree GC (3,62 Mg/ha). In HF esso varia da 1,57 a 2,19 Mg/ha tra le zone, invece in GC l'intervallo è molto più ampio, dalla media minima di 2,40 Mg/ha (GC 2019) alla massima di 5,87 Mg/ha (GC 2021). La differenza tra HF e GC nel carico di residui di classe 10h si riduce al 18%, con dei valori medi rispettivamente di 8,04 e 9,84 Mg/ha. Anche in questo caso la variabilità tra le aree GC è

maggiore: GC 2019 registra 6,31 Mg/ha, il dato più basso in assoluto, GC 2021 invece 13,80 Mg/ha, il dato più alto. Il carico medio della classe 100h è simile tra i sistemi; 13,07 Mg/ha per HF e 12,82 Mg/ha per GC. L'intervallo dei valori medi tra le aree HF si presenta però maggiore: dal carico medio d'area 9,33 Mg/ha (HF 2021) al più elevato 16,96 Mg/ha (HF 2019). Nelle aree GC si riporta un dato medio crescente dal 2019 al 2021: 11,80, 12,29 e 14,36 Mg/ha. Il carico medio dei CWD è maggiore in GC (17,34 Mg/ha) rispetto a HF (13,71 Mg/ha). Il sistema HF rilascia un carico medio di CWD compreso tra 12,16 (HF 2020) e 15,40 Mg/ha (HF 2019); il sistema GC un carico medio da 13,13 (GC 2020) a 22,99 Mg/ha (GC 2021). Mediando i valori di ogni classe riferiti al sistema di recupero HF si ottengono carichi di biomassa di: 1,82 Mg/ha per la classe 1h; 8,04 Mg/ha per la 10h; 13,07 Mg/ha per la 100h; 13,71 Mg/ha per la classe 1000h. Riguardo il sistema d'esbosco tramite gru a cavo si ottengono: 3,62 Mg/ha di residui di classe 1h; 9,84 Mg/ha di 10h; 12,82 Mg/ha di 100h; 17,34 Mg/ha per la *timelag class* 1000h (tab. 1).

Il carico di combustibile di un'area risulta formato in media dal 61,28% da FWD e dal 38,72% da CWD. Nei due sistemi di esbosco considerati questa ripartizione varia rispettivamente a 62,25% e 37,75% per HF, 60,31% e 39,69% per GC. Le aree con sistema HF riportano un valore totale di 36,64 Mg/ha, le aree

Tabella 1 – Carico (M) di biomassa residua per *timelag class* nelle aree di studio e biomassa totale in massa (M) e volume (V) valori fuori parentesi. Deviazione standard in parentesi.

Aree di studio	FWD			CWD	Totale	
	1h	10h	100h	1000h	M [Mg/ha]	V [m ³ /ha]
HF 2019	1,57 (1,09)	8,57 (3,56)	16,96 (9,48)	15,40 (7,19)	42,50 (18,66)	103,65 (45,52)
HF 2020	2,19 (0,82)	8,81 (3,79)	12,93 (13,14)	12,16 (11,29)	36,08 (21,21)	88,01 (51,74)
HF 2021	1,69 (0,86)	6,74 (3,12)	9,33 (2,86)	13,57 (6,66)	31,33 (8,57)	76,41 (20,91)
media HF	1,82 (0,94)	8,04 (3,50)	13,07 (9,66)	13,71 (8,40)	36,64 (17,03)	89,36 (41,54)
GC 2019	2,40 (1,06)	6,31 (2,28)	11,80 (9,17)	15,89 (8,25)	36,40 (13,79)	88,79 (33,63)
GC 2020	2,60 (1,21)	9,41 (4,54)	12,29 (4,73)	13,13 (8,38)	37,43 (14,59)	91,30 (35,59)
GC 2021	5,87 (3,12)	13,80 (6,20)	14,36 (7,39)	22,99 (11,73)	57,02 (23,16)	139,08 (56,50)
media GC	3,62 (2,53)	9,84 (5,44)	12,82 (7,13)	17,34 (10,14)	43,62 (19,56)	106,39 (47,71)

con sistema GC di 43,62 Mg/ha; il quantitativo medio tra sistemi è di 40,13 Mg/ha. HF 2021 risulta l'area a minor carico medio totale (31,33 Mg/ha), invece GC 2021 è la zona con maggior biomassa lasciata al suolo (57,02 Mg/ha). Calcolando il carico medio tra i transetti lungo linea d'esbosco e fuori linea, si ritrovano rispettivamente 45,46 Mg/ha e 37,46 Mg/ha. Il volume medio di residui per il sistema HF risulta 89,36 m³/ha, invece per il sistema GC ne risultano 106,39 m³/ha. Mediando i valori tra i sistemi di esbosco considerati, emerge un dato di 97,87 m³/ha di biomassa residua dopo gli interventi di recupero schianti.

Dalle analisi statistiche si è evinto che tra i due sistemi d'esbosco solo tra le distribuzioni di carico di combustibile di classe 1h emerge una differenza significativa. Tra le aree, GC 2021 si discosta sia da GC 2019 che da HF 2021 come valori di carico medio totale d'area. La quantità di biomassa rilevata all'esterno della linea d'esbosco non differisce statisticamente da quella lungo la linea nelle aree GC, invece, nelle aree HF il campione di carico medio totale di biomassa all'interno della pista d'esbosco risulta differente da quello dei transetti fuori pista.

Altezza dello strato di combustibile

I valori medi di altezza dello strato di combustibile per il sistema HF risultano decrescenti in ordine cronologico: l'area 2019 riporta un dato di 27,5 cm, l'area 2020 di 21,9 cm e l'area esboscata nel 2021 mostra un'altezza media di 21,1 cm. La media tra le zone HF è 23,5 cm. Il sistema GC non registra lo stesso andamento tra i valori medi d'area: per GC 2019 si calcola una media di 32,3 cm, GC 2020 presenta una media di 19,5 cm e GC 2021 di 23,7 cm. L'altezza di strato di combustibile per l'intero sistema GC è 25,2 cm; calcolando il valore medio tra i sistemi si ricava un dato di 24,33 cm. Non si rilevano differenze significative tra i dataset rispettivi ai due sistemi di recupero schianti.

Il sistema HF registra una differenza significativa tra i dati rilevati lungo le piste d'esbosco e fuori delle piste (fig. 3), con un valore medio rispettivamente di 17,8 cm e 26,3 cm. Lo strato di combustibile lungo linea e fuori linea nei siti

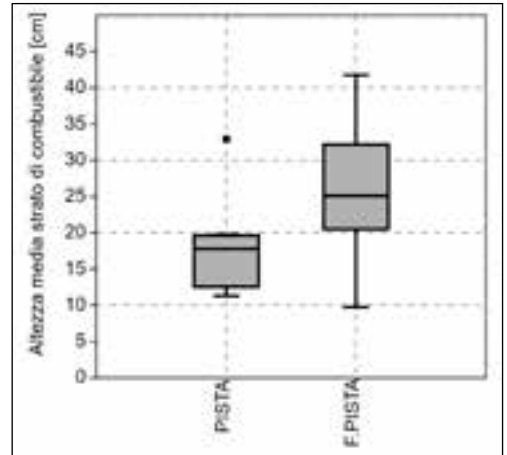


Figura 3 – Box-plot dei valori di altezza media dello strato di combustibile tra pista d'esbosco e fuori pista.

GC, invece, non risulta essere statisticamente differente: 23,7 cm all'interno della via d'esbosco e 26,0 cm all'esterno.

Dall'analisi dettagliata dei tipi di combustibile all'interno delle piste d'esbosco emerge che l'altezza media e la copertura dei tipi di combustibile è sempre minore sulle ormaie rispetto al centro pista. I residui legnosi, però, registrano la minor differenza nella copertura, pari al 55% in centro pista e 49% lungo le ormaie. La copertura arbustiva è assente in tutte le piste. Ricavando poi l'altezza dello strato di combustibile per le due porzioni di pista d'esbosco, il valor medio di ogni area HF lungo il centro del tracciato risulta maggiore che sul percorso delle ruote dei mezzi: in HF 2019 esso è pari a 32,2 cm al centro e 22,2 cm sulle ormaie; in HF 2020 rispettivamente 26,1 cm e 12,3 cm; in HF 2021 risulta 24,8 cm e 6,8 cm sulle tracce. Confrontando queste aree, tra le altezze dello strato di combustibile ricavate nelle ormaie esiste una differenza significativa. Solo nei siti esboscati nel 2020 e 2021, invece, si presenta una discrepanza tra i dataset riferiti al centro pista d'esbosco e le ormaie.

Modellizzazione del combustibile

Analisi dei nuovi modelli di combustibile

Inserendo nel software BehavePlus i valori di carico di combustibile medio delle prime

tre *timelag class* e l'altezza media dello strato di combustibile, sono stati messi a punto due nuovi modelli di combustibile: SB5 "Residui da recupero schianti con sistema *harvester-forwarder*" e SB6 "Residui da recupero schianti con sistema gru a cavo". La codifica ha seguito le indicazioni di SCOTT e BURGAN (2005) per la categoria *Slash-Blowdown* (SB).

L'analisi del comportamento del fronte di fiamma in SB5 con velocità del vento variabile evidenzia una netta differenza di velocità di propagazione del fuoco tra condizioni secche e umide: nello scenario D1L2 il fronte avanza con velocità da 0,9 fino a 2,7 m/min; in D4L4 esso raggiunge al più una velocità di 0,8 m/min a 40 km/h di vento. Considerando la lunghezza del fronte di fiamma, essa supera il metro solo in condizioni di forte disidratazione e velocità del vento maggiore di 30 km/h; invece, in condizioni particolarmente umide raggiunge al massimo 0,6 m. Esaminando la velocità di avanzamento in funzione della pendenza, i dati di velocità del fuoco si discostano tra scenari di umidità, assumendo però intervalli di valori ridotti: in condizioni secche la *rate of spread* varia da 1,6 a 2,2 m/min nell'intervallo di pendenza 10-50%; in situazioni di maggior contenuto d'umidità essa varia da 0,5 a 0,7 m/min. La condizione media D3L3 registra invece valori da 0,9 a 1,3 m/min di velocità di propagazione (fig. 4). In merito alla lunghezza di fiamma, al variare della pendenza, essa si attesta intorno a 1,0 m per D1L2; intorno a 0,7 m per D3L3; per D4L4 è stabile a 0,5 m.

In SB6 la velocità di propagazione del fron-

te radente in condizioni di forte disidratazione assume un andamento quasi lineare al variare della velocità del vento: da valori di 1,1 m/min a 10 km/h di vento, raggiunge 3,4 m/min con velocità del vento sui 40 km/h. In situazioni di maggior umidità la velocità di avanzamento aumenta fino ad un massimo di 1,1 m/min. La lunghezza di fiamma nello scenario più critico d'umidità cresce fino a un massimo di 1,5 m con 40 km/h di velocità del vento; invece, nello scenario D4L4 non supera 0,7 m. È stato poi analizzato il comportamento del fronte di fiamma al variare della pendenza della zona, considerando acclività fino al 100% data l'applicabilità del sistema di gru a cavo a queste condizioni. Lo scenario D1L2 registra i valori di velocità di propagazione dell'incendio più elevati; da 2,0 fino a 5,3 m/min. In condizioni umide il fronte raggiunge appena velocità di 1,8 m/min con pendenze del 100%. Lo scenario di umidità medio presenta velocità variabili da 1,2 a 3,1 m/min (fig. 4). La lunghezza del fronte di fiamma si presenta pari a 1,1 m in acclività del 10% per lo scenario più secco, fino ad arrivare ad un valore di 1,8 m al 100%. Lo scenario D4L4 fa registrare una lunghezza di fiamma intorno a 0,6-0,9 m. Nella condizione media d'umidità che caratterizza le aree, l'incendio può presentare lunghezze di fiamma tra 0,8 e 1,3 m.

Confronto con modelli di combustibile esistenti

I modelli di nuova implementazione sono stati confrontati con modelli esistenti riferiti a residui di utilizzazione o schianti: n. 11 "Resi-

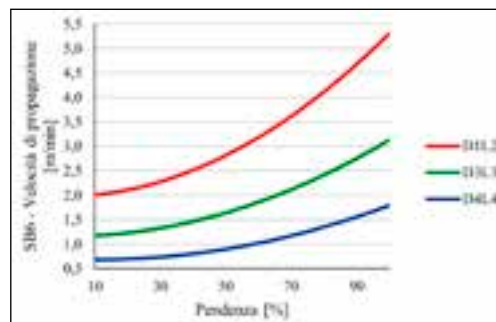
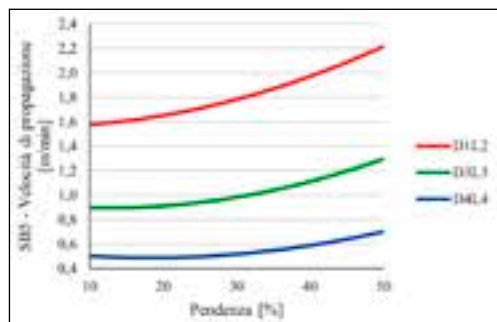


Figura 4 – Andamento della velocità di propagazione dell'incendio radente in funzione della pendenza del versante per diversi scenari di umidità del combustibile, in SB5 (sinistra) e SB6 (destra). Intervalli di valori differenti in ascissa e ordinata tra i grafici.

dui di esbosco leggeri”, n. 12 “Residui di esbosco medi” (ROTHERMEL, 1972), SB1 “Residui-Schianti: basso carico di combustibile attivo” e SB2 “Residui-Schianti: moderato carico di combustibile attivo o basso carico da schianto” (SCOTT, BURGAN, 2005). La differenza sostanziale tra i nuovi modelli e gli esistenti è la presenza nei primi di componente erbacea viva.

Indagando il comportamento del fronte di fiamma con velocità del vento variabile, il n. 11 presenta dati più vicini a SB6, con velocità di propagazione da 1,0 m/min con minor vento a 3,1 m/min a 40 km/h di vento. Il modello SB1 presenta un fronte di fiamma con velocità molto simili al n. 11 fino a circa 30 km/h di vento, invece SB2 e n. 12 riportano propagazioni che arrivano o superano 8 m/min con vento a 40 km/h. SB5 risulta il modello con velocità di avanzamento del fronte più lenta. Riguardo la probabile lunghezza di fiamma, SB5 rimane caratterizzato da valori più bassi di SB6, ma quest’ultimo presenta un intervallo di valori identici a SB1 (0,6-1,1 m). Anche il n. 11 riporta lunghezze di fiamma simili, da 0,7 a 1,2 m all’aumentare della velocità del vento. Pendenze di versante tra il 10 e 50% comportano variazioni contenute nei parametri che descrivono il comportamento del fuoco. Considerando la massima pendenza per il sistema HF (50%), SB5 e SB6 presentano velocità di avanzamento del fronte di fiamma rispettivamente di 1,3 e 1,6 m/min. Tra i modelli esistenti più simili, il n. 11 presenta avanzamenti di 2,5 m/min e SB1

di 2,6 m/min, invece i modelli di carico medio di residui superano entrambi valori di 6 m/min a data pendenza (fig. 5). La lunghezza del fronte di fiamma non risulta molto condizionata da tale intervallo di pendenze. Condizioni pari a SB5 registrano lunghezze intorno a 0,7 m; in SB6 invece si attestano intorno a 0,9 m. I modelli a basso carico, n. 11 e SB1, riportano valori simili (circa 1,0 m e 0,9 m), invece, in caso di medio carico di residui, la fiamma raggiunge 2,5 m per il n. 12 e 1,7 m per SB2 già con pendenze del 10%.

Ulteriore confronto si è eseguito con modelli riferiti ad altre categorie di combustibile che presentano un comportamento del fronte di fiamma simile a SB5 e SB6. Da data selezione sono emersi: n. 5 “Arbusteto” (ROTHERMEL, 1972), GS3 “Carico moderato, erba e arbusti di clima umido”, SH3 “Carico moderato, arbusti di clima umido”, TU2 “Carico moderato, alberi e arbusti di clima umido”, TL5 “Alto carico di lettiera di conifera”, TL7 “Grossi tronchi a terra” (SCOTT, BURGAN, 2005). Analizzando il comportamento del fuoco in funzione della velocità del vento, SB6 presenta velocità d’avanzamento del fronte di fiamma simili a SH3 e TL5: il modello di combustibile di nuova implementazione riporta un intervallo 0,6-2,0 m/min, SH3 pari a 0,5-2,1 m/min, TL5 tra 0,6 e 2,2 m/min. In SB5 si registrano valori poco più ridotti, da 0,5 a 1,5 m/min, i quali si avvicinano a comportamenti tipici del modello TL7 (0,4-1,2 m/min). Acclività di versante dal 10 al 50% com-

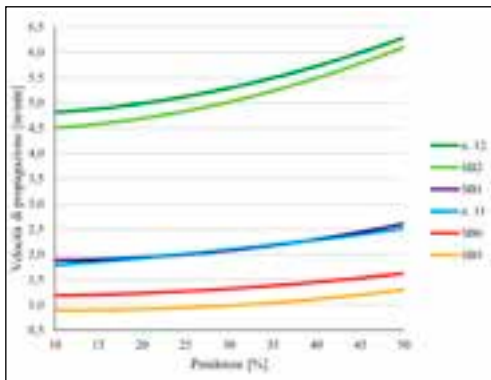


Figura 5 – Andamento della velocità di propagazione dell’incendio radente in funzione della pendenza del versante per modelli di combustibile riferiti a residui.

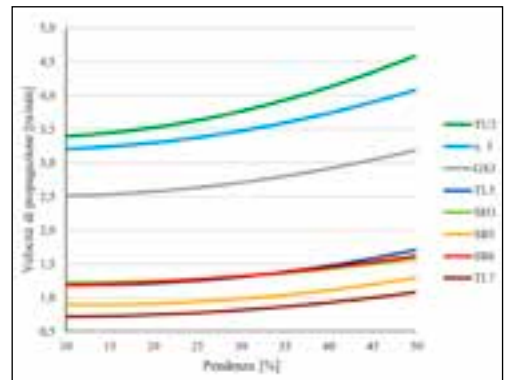


Figura 6 – Andamento della velocità di propagazione dell’incendio radente in funzione della pendenza del versante per modelli di diverse categorie di combustibili.

portano valori di *rate of spread* tra 1,2 e 1,6 m/min in SB6, egualmente a SH3 (1,2-1,6 m/min) e molto simile a TL5 (1,2-1,7 m/min). SB5 registra velocità d'avanzamento minori (0,9-1,3 m/min), ma comunque maggiori rispetto al modello TL7 (0,7-1,1 m/min) (fig. 6). L'andamento dei valori di lunghezza di fiamma, invece, non riscontra somiglianze tra i gruppi di modelli a confronto.

Discussione

Biomassa residua

Il carico di biomassa residua assume valori crescenti in tutte le aree all'aumentare del diametro dei FWD. Questi, nonostante siano una piccola frazione se comparati alla biomassa esboscata, contengono elementi chiave per la crescita del bosco (LATTIMORE *et al.*, 2009; AHERNE *et al.*, 2012; AUGUSTO *et al.*, 2015; STEVENS *et al.*, 1995). Se comparati invece alla frazione di CWD, ne risulta che i residui fini occupano in media circa il 61% del carico di biomassa totale delle classi per entrambi i sistemi d'esbosco. Questa quantità, nota la contenuta lunghezza di campionamento del materiale più fine, indica la presenza di accumuli localizzati di residui nelle aree di schianto esboscate, concentrazioni osservate anche in fase di rilievo. Questi cumuli possono essere dei punti preferenziali di innesco di incendio, sia per causa antropica che da fenomeni temporaleschi, comprovate origini d'incendio boschivo in Provincia di Trento (PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, 2016). Inoltre, la presenza di concentrazioni di biomassa in vicinanza di zone di passaggio, come le piazzole di posizionamento delle torrette di gru a cavo, aumenta il rischio d'innesco colposo o doloso. La combustione di questi accumuli può anche portare ad un aumento dell'intensità e della durata dell'incendio, favorendo la diffusione del fuoco attraverso il passaggio in chioma e tramite la proiezione di materiale ardente con fenomeni di *spotting* (RIZZOLO, 2020).

Si è osservato che il sistema d'esbosco incide particolarmente sul carico dei residui più fini, il quale risulta maggiore in caso di esbosco tramite gru a cavo. Anche il carico medio

totale di biomassa residua emerge superiore in GC (43,62 Mg/ha) rispetto a HF (36,64 Mg/ha), nonostante nell'esbosco via cavo si prelevi il legname ad albero intero, destinando la ramaglia alla produzione di cippato. Dato esito può ricondursi alla particolare esecuzione degli interventi nelle aree GC, dove l'acclività del terreno e la morfologia del versante possono limitare il prelievo del materiale schiantato in zone difficili da raggiungere per gli operatori.

Il volume medio totale di biomassa residua è di 97,87 m³/ha; esso risulta di lunga superiore alle soglie minime di necromassa per il mantenimento della biodiversità indicate da BÜTLER e SCHLAEPFER (2004) e MÜLLER e BÜTLER (2010). Il risultato si presenta anche maggiore della stima di ERÄJÄÄ *et al.* (2010) in aree soggette a taglio raso e all'intervallo di necromassa residua suggerito da DEL FAVERO *et al.* (2019). Eseguendo un confronto con rilievi eseguiti nelle zone colpite dagli uragani Vivian e Lothar e soggette a interventi di *salvage-logging* (CIOLDI *et al.*, 2010; PRIEWASSER *et al.*, 2013), il volume medio ottenuto in questo lavoro di tesi è maggiore. Si può quindi affermare che, nonostante l'esbosco del legname schiantato, le aree di studio presentano un quantitativo di necromassa idoneo al mantenimento della biodiversità e maggiore di aree sottoposte a taglio raso o recupero schianti in altre zone d'Europa. Questi residui legnosi possono inoltre mantenere una funzione di stoccaggio di carbonio e di mitigazione dei fenomeni erosivi e gravitativi (COSTA *et al.*, 2021).

Strato di combustibile

L'altezza dello strato di combustibile non risulta essere influenzata dal sistema di esbosco e il tempo trascorso dall'intervento non sembra avere un effetto chiaro, probabilmente per il limitato lasso di tempo tra gli interventi.

Il sistema HF si distingue per generare una disomogeneità nello strato di combustibile lungo le vie d'esbosco, a causa del transito e manovra dei mezzi. Specificatamente sulle piste d'esbosco, il centro della via e le ormaie riportano valori differenti tra loro nelle aree esboscate negli anni 2021 e 2020. Questo, insieme al fatto che si registrano differenze significative tra le altezze dello strato di combustibile sulle

ormai delle aree di diverso anno di intervento, porta a ipotizzare che le tracce generate dai mezzi vengano gradualmente colonizzate dalla vegetazione in circa tre anni, ristabilendo così la continuità tra i combustibili. Oltre a ciò, la copertura media dei residui legnosi è simile in tutta la pista e lo strato erbaceo ai lati della stessa piegandosi naturalmente o con il vento viene facilmente a contatto con quello al centro. Le ormaie possono, quindi, non costituire un ostacolo all'avanzamento del fronte di fiamma. D'altra parte, l'instaurarsi di fenomeni di ruscellamento lungo le piste principali può rendere difficile la propagazione del fuoco.

Modelli di combustibile

L'assenza di modelli di combustibile predisposti per condizioni post-esbosco di aree soggette a schianti da vento ha condotto alla costruzione di nuovi modelli: SB5 "Residui da recupero schianti con sistema HF" e SB6 "Residui da recupero schianti con sistema GC". Considerando il modello di combustibile riferito alle aree HF (SB5), solo in condizioni di forte disidratazione del combustibile la velocità di avanzamento del fronte di fiamma supera 2 m/min con venti o pendenze elevate. La fiamma che si genera non supera l'altezza di 1,2 m. Questi dati portano a supporre che al verificarsi di un incendio radente in aree soggette a esbosco tramite sistema HF l'attacco diretto da terra è sempre possibile, agendo lungo il perimetro con attrezzi a mano o pompe spalleggiate. In condizioni di modesta umidità, il fronte di fiamma assume una lunghezza difficilmente al di sopra di 0,85 m, in cui quindi è valutabile l'attuazione del fuoco prescritto (BEAVER, 2001). Il modello SB6 riporta una velocità di propagazione che, con situazioni critiche di vento e umidità del combustibile, può attestarsi sui 3,5 m/min. In versanti molto ripidi, però, l'avanzamento può registrare velocità oltre 5 m/min. Ciò indica che con venti tesi o versanti ripidi e combustibili disidratati l'attacco al fronte risulta possibile solo con macchinari pesanti o elicotteri leggeri. Se l'incendio raggiunge piante in piedi si possono formare incendi di chioma passivi con fenomeni di *torching*

(BEAVER, 2001). Con contenuti medi d'umidità dei combustibili, invece, le fiamme si attestano al di sotto di 1,4 m, quindi l'attacco diretto risulta essere possibile. Nonostante ciò, in tutti i casi, se l'inclinazione del terreno supera i 30° (58% circa) l'attacco da terra non è da considerare, per evitare rischi agli operatori addetti alle azioni di spegnimento (BOVIO, 1996).

I modelli di nuova implementazione, tra i quali soprattutto SB6, mostrano un fronte di fiamma con lunghezza simile ai modelli relativi ad aree con residui di utilizzazione o soggette a schianti (n. 11 e SB1), probabilmente dovuto a una simile altezza dello strato di combustibile. In merito alla velocità d'avanzamento dell'incendio, invece, le condizioni riferite a SB5 e SB6 determinano scenari di propagazioni inferiori ai modelli esistenti di basso carico di residui. Questo può essere dovuto al minor carico di combustibili fini dei modelli SB5 e SB6, ma anche alla componente erbacea viva che richiede un apporto maggiore di energia nella fase di preriscaldamento.

Paragonando i carichi di combustibile con modelli di altre categorie, come già indicato anche da RIZZOLO (2020), le aree soggette a interventi di recupero (SB5, SB6) possiedono un carico totale superiore a quello di boschi non colpiti da schianti (TU2, TL5, TL7), ma comunque inferiore a schianti non rimossi (SB2). I modelli connessi ad alto carico di lettiera di conifere (TL5) e ad arbusti di clima umido (SH3) si rivelano gli unici che presentano un comportamento simile a quelli di nuova implementazione per quanto concerne la velocità di avanzamento, ma la variazione della lunghezza di fiamma in funzione di vento o pendenza non trova somiglianze.

Dai confronti effettuati si può affermare che i nuovi modelli di combustibile mostrano un comportamento di incendio radente riconducibile a condizioni di residui leggeri, come il modello n.11 di ROTHERMEL (1972) e SB1 di SCOTT e BURGAN (2005).

Conclusioni

Il presente studio ha quantificato la bio-

massa residua a seguito di cantieri forestali di recupero schianti in peccete altimontane interessate dalla tempesta Vaia. Nelle aree esboscate con sistema motosega-gru a cavo la biomassa presente risulta superiore rispetto alle aree soggette a interventi con sistema *harvester-forwarder*. In termini quantitativi, in tutte le aree (con entrambi i metodi di esbosco) il volume di biomassa residua è superiore ai valori minimi di necromassa indicati per il mantenimento della biodiversità. L'altezza dello strato di combustibile non mostra forti disequaglianze tra i sistemi. Solo in maniera localizzata si presentano delle discontinuità nelle piste d'esbosco, ma temporanee e di ridotte dimensioni rispetto alla superficie di schianto. La modellizzazione dei combustibili ha condotto alla implementazione dei modelli SB5 e SB6, specifici per residui da recupero schianti con sistema HF e GC rispettivamente. Il comportamento del fronte di fiamma radente previsto per queste condizioni di combustibili risulta gestibile con un attacco diretto da terra nella maggior parte degli scenari. L'utilizzo dei nuovi modelli per la previsione del comportamento del fuoco può essere di particolare ausilio alla mappatura e aggiornamento del rischio di incendi boschivi in queste tipologie di aree.

Sviluppi futuri di questo studio potranno chiarire con maggior dettaglio il cambiamento delle condizioni dei combustibili nel tempo, verificando anche l'intervallo di tempo trascorso dall'intervento per il quale i modelli di nuova creazione possono essere applicati. Inoltre, estendendo lo studio ad altre aree con condizioni simili lungo l'arco alpino si potrà rendere i modelli maggiormente rappresentativi a livello geografico. Ulteriori studi sono invece necessari per comprendere con maggior dettaglio l'influenza delle piste d'esbosco nella propagazione dell'incendio, per quantificare lo *stock* di carbonio rimanente nei residui di utilizzazione in seguito a interventi di recupero schianti e per analizzare l'influenza della biomassa rilasciata nella mitigazione dei fenomeni erosivi.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Dott. Lorenzo Garollo, per aver condiviso la fase di rilievo di questo studio, e l'Agenzia Provinciale delle Foreste Demaniali trentine per le informazioni e la grande disponibilità, in particolare i Dott. Paolo Kovatsch, Girolamo Scarian, Alberto Volcan, Paolo Miola e Martino Gambacorti.

APPENDICE I

Contenuto di umidità [%] dei combustibili vivi e morti per la costruzione dei moisture scenario (fonte: SCOTT, BURGAN, 2005).

Combustibili morti	D1	D2	D3	D4
	Molto basso	Basso	Moderato	Alto
1h	3	6	9	12
10h	4	7	10	13
100h	5	8	11	14
Combustibili vivi	L1	L2	L3	L4
	Tot. essiccato	2/3 essiccato	1/3 essiccato	Tot. verde
	Molto basso	Basso	Moderato	Alto
Erba viva	30	60	90	120
Legno vivo	60	90	120	150

BIBLIOGRAFIA

- AHERNE J., POSCH M., FORSIUS M., LEHTONEN A., HARKONEN K., 2012 – *Impacts of forest biomass removal on soil nutrient status under climate change: A catchment-based modelling study for Finland*. Biogeochemistry 107: 471-488.
- AUGUSTO L., ACHAT D.L., BAKKER M.R., BERNIER F., BERT D., DANJON F., KHLIFA R., MEREDIEU C., TRICHET P., 2015 – *Biomass and nutrients in tree root systems – Sustainable harvesting of an intensively managed Pinus pinaster (Ait.) planted forest*. GCB Bioenergy 7: 231-243.
- BEAVER A., 2001 – *Evaluating Risk and Reward Relationships in Wildland Firefighter Safety*. In atti della «Wildland Fire Safety Conference», University of Montana, Missoula, MT, Novembre 6-8, 2001.
- BOUGET C., LASSAUCE A., JONSELL M., 2012 – *Effects of fuelwood harvesting on biodiversity: A review focused on the situation in Europe*. Can. J. For. Res. 42: 1421-1432.
- BOVIO G., 1996 – *Come proteggerci dagli incendi boschivi*. Protezione Civile e Ambiente, Presidenza della Giunta, Servizio di Protezione Civile, Torino.
- BROWN J.K., 1971 – *A planar intersect method for sampling fuel volume and surface area*. For. Sci. 17(1): 96-102, Illus.
- BROWN J.K., 1974 – *Handbook for inventorying downed woody material*. USDA Forest Service General Technical Report.
- BROWN J.K., ROUSSOPOULOS P.J., 1974 – *Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels*. For. Sci. 20 (4): 350-356.
- BÜTLER R., SCHLAEFFER R., 2004 – *Wie viel Totholz braucht der Wald?* Schweiz Z Forstwes 150: 31-37.
- COSTA M., MARCHI N., BETTELLA F., BOLZON P., BERGER F., LINGUA E., 2021 – *Biological Legacies and Rockfall: The Protective Effect of a Windthrown Forest*. FORESTS, 12(9), 1141.
- DEL FAVERO R., LINGUA E., PIVIDORI M., 2019 – *Selvicoltura per la protezione dai disturbi*. Arezzo, Compagnia delle Foreste S.r.l.
- CIOLDI F., BALTENSWEILER A., BRÄNDLI U.B., DUC P., GINZLER C., BONARDI A.H., THÜRIG E., ULMER U., 2010 – *Waldressourcen*. In: Brändli U.B. (ed) Schweizerisches Landesforstinventar Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 31-114.
- ERÄJÄÄ S., HALME P., KOTIAHO J.S., MARKKANEN A., TOIVANEN T., 2010 – *The volume and composition of dead wood on traditional and forest fuel harvested clear-cuts*. Silva Fenn. 44: 203-211.
- FRAMES, 2022 – <https://www.frames.gov/behavplus/home> (ultima visita: 18/03/2022).
- GÖMÖRYOVÁ E., STRELCOVÁ K., SKVARENINA J., BEBEJ J., GÖMÖRY D., 2008 – *The impact of windthrow and fire disturbances on selected soil properties in the Tatra National Park*. Soil and Water Research 3 (Special Issue 1): S74-S80.
- HEINIMANN H.R., 2000 – *Forest Operations under Mountainous Conditions*. Forests in Sustainable Mountain Development: a State of Knowledge Report for 2000 (5): 224-230.
- LANORTE A., LASAPONARA R., 2008 – *Fuel type characterization based on coarse resolution MODIS satellite data*. iForest-Biogeosciences and Forestry 1(1): 60-64.
- LARRIEU L., CABANETTES A., GOUX N., BURNEL L., BOUGET C., DECONCHAT M., 2019 – *Post-harvesting dynamics of the deadwood profile: The case of lowland beech-oak coppice-with-standards set-aside stands in France*. Eur. J. For. Res.
- LATTIMORE B., SMITH C.T., TITUS B.D., STUPAK I., EGNELL G., 2009 – *Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, criteria and indicators for sustainable practices*. Biomass Bioenergy 33: 1321-1342.
- LEVERKUS A.B., BUMA B., WAGENBRENNER J., BURTON P.J., LINGUA E., MARZANO R., THORN S., 2021 – *Tamm review: Does salvage logging mitigate subsequent forest disturbances?* Forest Ecology And Management, 481, 118721.
- METEOTRENTINO, 2022 – <https://www.meteotrentino.it/> (ultima visita: 29/03/2022).
- MIETTINEN J., OLLIKAINEN M., NIEMINEN T.M., UKONMAANAHO L., LAURÉN A., HYNYNEN J., LEHTONEN M., VALSTA L., 2014 – *Whole-tree harvesting with stump removal versus stem-only harvesting in peatlands when water quality, biodiversity conservation and climate change mitigation matter*. For. Policy Econ. 47: 25-35.
- MÜLLER J., BÜTLER R., 2010 – *A review of habitat thresholds for dead wood: a baseline for management recommendations in European forests*. Eur. J. For. Res. 129: 981-992.
- PILLI R., VIZZARRI M., CHIRICI G., 2021 – *Combined effects of natural disturbances and management on forest carbon sequestration: The case of Vaia storm in Italy*. Annals of Forest Science, 78 (2), 46.
- PRIEWASSER K., BRANG P., BACHOFEN H., BUGMANN H., WOHLGEMUTH T., 2013 – *Impacts of salvage-logging on the status of deadwood after windthrow in Swiss forests*. Eur. J. For. Res. 132: 231-240.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, 2016 – *Relazione sull'attività svolta dal Servizio Foreste e Fauna nel 2015*. Servizio Foreste e Fauna, Trento.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, 2020 – *Piano d'azione Vaia in Trentino. Levento, gli interventi, i risultati*. Sherwood 248, Supplemento 2.
- ROTHERMEL R.C., 1972 – *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Research Paper, Int.115, Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service.
- RIZZOLO R., 2016 – *Fuel models development to support spatially-explicit forest fire modelling in Eastern Italian Alps*. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova, Legnaro (PD).
- RIZZOLO R., 2020 – *Il pericolo di incendi boschivi nelle aree soggette a schianti a seguito della tempesta Vaia*. Delibera del Consiglio Regionale n. 14 del 28 gennaio 2020, Regione del Veneto.

SCOTT J.H., BURGAN R.E., 2005 – *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153, Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service.

STEVENS P.A., NORRIS D.A., WILLIAMS T.G., HUGHES S., DURRANT D.W.H., ANDERSON M.A., WEATHERLEY N.S., HORNUNG M., WOODS C., 1995 – *Nutrient losses after clearfelling in Beddgelert Forest: A comparison of the effects of conventional and whole-tree harvest on soil water chemistry*. For. Int. J. For. Res. 68: 115-131.

VAN WAGNER C.E., 1968 – *The Line Intersect Method In Forest Fuel Sampling*. Forest Science 14: 20-26.

VERKERK P.J., LINDNER M., ZANCHI G., ZUDIN S., 2011 – *Assessing impacts of intensified biomass removal on deadwood in European forests*. Ecol. Indic. 11: 27-35.

Davide Benetel

E-mail: davide.benetel@studenti.unipd.it
 o dbenetel@gmail.com
 Cell. 347 855 1451

Flavio Taccaliti

E-mail: flavio.taccaliti@unipd.it
 Cell. 347 593 7012

Stefano Grigolato

E-mail: stefano.grigolato@unipd.it
 Tel. 39 049 827 2701

Emanuele Lingua

E-mail: emanuele.lingua@unipd.it
 Tel. +39 049 827 2711

Università degli Studi di Padova
 Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali
 Viale dell'Università 16 – 35020 Legnaro (PD)

PAROLE CHIAVE: *biomassa residua, combustibile, recupero schianti*

RIASSUNTO

La quantità di biomassa residua e lo strato di combustibile sono stati studiati in aree oggetto di recupero schianti nelle Foreste Demaniali trentine, nelle Alpi orientali italiane. I cantieri forestali analizzati si sono suddivisi per sistema di recupero impiegato, harvester e forwarder (HF) o motosega e gru a cavo (GC), e anno d'intervento, dal 2019 al 2021. I combustibili rilevati sono stati poi modellizzati per creare nuovi modelli di combustibile dedicati. La biomassa rilasciata a terra dagli interventi di *salvage-logging* assume un ruolo fondamentale per il mantenimento della

biodiversità degli ecosistemi. Si è osservato che il volume medio di biomassa residua emerge superiore con l'applicazione del sistema GC (106,39 m³/ha) rispetto al sistema HF (89,36 m³/ha). Per entrambi i sistemi i residui fini occupano in media circa il 61% del carico totale. I sistemi d'esbosco considerati in questo studio non determinano altezze dello strato di combustibile significativamente diverse, ma nelle aree HF le piste d'esbosco si presentano come punti di discontinuità.

La presenza di residui legnosi a terra può aumentare il rischio d'incendio boschivo. La previsione del comportamento del fronte di fiamma è stata eseguita realizzando i nuovi modelli di combustibile SB5 "Residui da recupero schianti con sistema HF" e SB6 "Residui da recupero schianti con sistema GC". Al verificarsi di un incendio radente in date zone la lotta antincendio condotta da terra è possibile nella maggior parte delle condizioni. Dai confronti effettuati, i nuovi modelli conducono a un comportamento d'incendio radente riconducibile a condizioni di residui leggeri, come il modello n.11 di ROTHERMEL (1972) e SB1 di SCOTT e BURGAN (2005).

KEYWORDS: *residual biomass, fuel, salvage-logging*

ABSTRACT

The amount of residual biomass and the fuel layer were studied in salvage-logged areas after windthrows in the Trentino Provincial Forests, in the Eastern Italian Alps. The forest yards analysed were divided by salvage-logging system, harvester and forwarder (HF) or chainsaw and cable yarder (GC), and year of intervention, from 2019 to 2021. Then, detected fuels were modelled to create new fuel models. The biomass released on the ground by salvage-logging operations plays a key role in maintaining the biodiversity of ecosystems. The average residual biomass volume was found to be higher with the application of the GC system (106,39 m³/ha) than with the HF system (89,36 m³/ha). For both systems, fine residues occupy on average about 61% of the total load. The logging systems considered in this study do not result in significantly different fuelbed depth, but in HF areas the timber extraction roads appear as points of discontinuity of the fuel.

The presence of woody debris on the ground increases the risk of forest fires. The prediction of the flame front behaviour was carried out by creating the new fuel models SB5 "Residues from salvage-logging with HF system after wind-throws" and SB6 "Residues from salvage-logging with GC system after wind-throws". In the event of a surface fire in the study areas, ground firefighting is possible under most conditions. From the comparisons made, the new models lead to a surface fire behaviour comparable with light load of residues conditions, such as ROTHERMEL's n. 11 (1972) and SCOTT and BURGAN's SB1 (2005).