



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali
Curriculum Protezione del Territorio

Analisi dell'evoluzione della biomassa a terra a
seguito della tempesta Vaia tramite fotogrammetria

Relatore
Prof. Emanuele Lingua
Correlatore
Dott. Tommaso Baggio

Laureanda/o
Michele Ravagni
Matricola n. 2048401

ANNO ACCADEMICO 2023/24

Sommario

Riassunto.....	3
Abstract.....	5
1 INTRODUZIONE.....	7
1.1 Disturbi da vento.....	7
1.1.1 Tempeste da vento.....	11
1.1.2 Conseguenze e impatti.....	15
1.1.3 Tempesta Vaia.....	16
1.2 Foreste di protezione.....	20
1.3 Interventi Post-disturbo.....	22
1.3.1 Salvage logging.....	24
1.3.2 No intervention.....	27
2 Obiettivi.....	31
3 Materiali e metodi.....	33
3.1 Inquadramento aree di studio.....	33
3.1.1 Franza.....	38
3.1.2 Col di lana.....	39
3.2 Rilievi in campo.....	40
3.3 Elaborazione dati telerilevati.....	42
3.4 Dati altezza neve.....	45
4 Risultati.....	49
4.1 Movimenti orizzontali.....	49
4.2 Movimenti verticali.....	50
4.3 Confronto movimenti con altezza neve.....	54
4.4 Altezza elementi dal suolo.....	57
5 Discussione.....	59
6 Conclusioni.....	62
7 Bibliografia.....	64

RIASSUNTO

Nell'ottobre 2018 l'Italia fu colpita dalla violenta tempesta Vaia, che causò numerosi danni e schianti da vento, su una superficie complessiva di 42'525 ettari.

Normalmente, le amministrazioni ed enti locali in fase post-evento provvedono a recuperare il materiale a terra (salvage logging) e spesso queste operazioni sono seguite dall'installazione di opere protettive, laddove è necessario. Tuttavia, in determinate circostanze di estensione di area colpita e disomogeneità del disturbo queste operazioni non sono sempre possibili.

Un'area colpita da disturbo da vento però possiede comunque una certa capacità di protezione dai disturbi naturali, soprattutto valanghe e caduta massi, specialmente nei primi anni in seguito alla tempesta. Obiettivo di questa tesi è di identificare la disposizione dei tronchi lasciati a terra post-disturbo da vento e tramite un'analisi multitemporale valutare il loro spostamento e abbassamento e verificare se la copertura nevosa è un fattore determinante in questo processo.

In questo lavoro di tesi vengono analizzati i movimenti dei tronchi a terra in due aree studio, situate nell'area dolomitica del comune di Livinallongo del Col di Lana (BL). Vengono prima analizzati i movimenti planimetrici nei diversi anni di rilievo e successivamente l'abbassamento dei tronchi, soprattutto in relazione alle altezze del manto nevoso nelle corrispondenti stagioni invernali.

Per queste operazioni sono stati effettuati rilievi con drone e tramite tecnica fotogrammetrica si sono derivati i modelli digitali di elevazione (DEM) e ortofoto ad alta risoluzione. Per l'area Franza sono stati effettuati 5 rilievi a cadenza annuale dal 2019 al 2023, mentre nell'area Col di lana sono stati eseguiti 2 rilievi, rispettivamente nel 2020 e nel 2022.

Con strumenti Gis si è proceduto all'elaborazione dei dati telerilevati, in primo luogo tramite identificazione di tronchi a terra per ogni rilievo effettuato.

Successivamente si è calcolato lo spostamento planimetrico e l'altezza rispetto al suolo di ciascuno di essi. Dai risultati è emerso che i tronchi mostrano spostamenti sia orizzontali che verticali in entrambe le aree, con risultati più significativi nell'area Franza, perché si disponeva di più serie di dati. In Franza, dal 2019 al 2023, i tronchi si sono abbassati in media di 28 cm e spostati in media di 27 cm, mentre in Col di lana, dal 2020 al 2022, si sono abbassati in media di 8 cm e spostati mediamente di 22 cm. È stato osservato che la stagione invernale con i maggiori valori massimi mensili di altezza neve del periodo considerato (2020-21) ha causato maggiori movimenti, sia orizzontali che verticali, in egual misura. In Franza, in quell'anno, l'abbassamento medio è risultato di 12 cm e lo spostamento medio di 10 cm. Attraverso l'analisi delle altezze dei tronchi per differenti livelli di altezza dal suolo (0.5, 1 e 1.5 m) è stato osservato che quattro anni dopo la tempesta, la maggior parte dei tronchi aveva un'altezza uguale o inferiore a 1.5 m. Mediante il confronto con altri

studi, è stato verificato che i risultati di questa tesi sono in linea con alcune ricerche presenti in letteratura, soprattutto con quelle svolte in Svizzera in seguito alla tempesta Vivian (1990). Nel complesso, l'analisi contribuisce ad arricchire il dataset sui movimenti dei tronchi, attualmente carente in letteratura. Sarà necessario continuare ad effettuare questi monitoraggi per supportare la definizione del grado di protezione di un'area lasciata a libera evoluzione (No intervention) e per approfondire in maniera quantitativa e qualitativa la valutazione dell'intervallo temporale dove la funzione protettiva può risultare insufficiente.

ABSTRACT

In October 2018, Italy was hit by Vaia storm, resulting in extensive wind damage and the downing of approximately 8.5 million cubic meters of timber for an extension of 42,525 hectares. Typically, post-event salvage logging is the traditional practice of local authorities, followed by the installation of protective measures where necessary. However, in certain circumstances involving extensive and unevenly disturbed areas, these operations may not always be feasible.

Despite this, areas affected by wind disturbances can still have certain level of natural protection against natural hazards, particularly for snow avalanches and rockfalls, especially in the initial years following the storm. The objective of this thesis is to identify the arrangement of wind-disturbed logs on the ground and assess their movement and decrease in height respect the ground through a multi-temporal analysis. The study also aims to investigate if the snow cover plays a significant role in these processes.

The thesis analyzes the movements of the fallen logs in two study areas located in the Dolomitic region within the municipality of Livinallongo del Col di Lana (BL). The thesis analysed the planimetric movements and vertical movements in different years, especially concerning the snow cover height during the winter seasons. Drone surveys and photogrammetric techniques were employed to derive high-resolution Digital Elevation Models (DEM) and orthophotos. In the Franza area, five surveys were conducted annually from 2019 to 2023, while in the Col di Lana area, two surveys were performed in 2020 and 2022.

Geographic Information System (GIS) tools were used for processing remotely sensed data, initially by identifying fallen logs for each survey. Subsequently, planimetric displacement and height above the ground for each trunk were calculated. The results indicate that logs exhibit both horizontal and vertical movements in both areas, with more significant outcomes observed in the Franza area due to a more extensive dataset. In Franza, from 2019 to 2023, logs subsided on average by 28 cm and shifted by an average of 27 cm, while in Col di Lana, from 2020 to 2022, they subsided on average by 8 cm and shifted by an average of 22 cm. It was observed that the winter season with the highest monthly snow height values during the considered period (2020-21) caused more movements, both horizontal and vertical, in equal measure. In Franza, during that year, the average subsidence was 12 cm, and the average shift was 10 cm.

Through the analysis of the logs heights at different classes above the ground (0.5, 1, and 1.5 m), it was possible to highlight that four years after the storm, most of the logs had a height equal to or less than 1.5 m. Comparisons with other studies confirmed that the results of this thesis align with existing literature, especially studies conducted in Switzerland following the Vivian storm (1990). Overall, the analysis contributes to enriching the dataset on trunk movements, currently lacking in the literature. Continued monitoring is therefore necessary to support the definition of the protection level in "No intervention" areas and to better assess the protection time gap that occurs in these areas.

1 INTRODUZIONE

1.1 Disturbi da vento

Il vento, di solito inteso sul piano orizzontale, è lo spostamento di una massa d'aria da zone ad alta pressione (anticicloniche) a zone a bassa pressione (cicloniche).

Il vento, con velocità inferiore a 50 km/h, viene considerato un elemento utile alla regolazione dei sistemi forestali, in quanto facilita la disseminazione delle specie anemocore, l'impollinazione, la traspirazione e regola la struttura, le fasi di crescita, le successioni e le dinamiche di rinnovazione dei popolamenti (Del Favero, Lingua, Pividori, 2019).

Quando la velocità aumenta, il vento è un'agente che può provocare disturbo, ovvero un'alterazione della struttura di un ecosistema, comunità o popolazione. Se di minore intensità il vento può provocare fenomeni di stress, cioè deviazioni delle condizioni ottimali di sopravvivenza dell'individuo, specie o popolazione (Larcher, 2001).

Il vento diventa invece fattore limitante quando le condizioni diventano critiche, ovvero superano le intensità dello stress e caratterizzato da un evento continuo, ma una situazione che persiste nel tempo (Del Favero, Lingua, Pividori, 2019).

Dal punto di vista fisico, gli schianti da vento si verificano quando le forze orizzontali esercitate sull'albero e trasmesse al fusto, generano un momento che supera la resistenza del sistema radici-suolo o la resistenza meccanica delle fibre legnoso del fusto.

Le forze orizzontali che agiscono sono essenzialmente due:

- la forza esercitata dal vento sulla chioma (carico di vento), che dipende dalla densità dell'aria, dall'area di proiezione della chioma, dalla resistenza aerodinamica della chioma e della velocità del vento.
- La forza di gravità che si genera quando l'albero si piega e si allontana dall'asse verticale (Stathers et al., 1994).

La resistenza di un albero allo sradicamento dipende invece dall'ancoraggio al suolo, mentre la resistenza del fusto alla rottura è data dalla resistenza del legno (Gardiner, 2013).

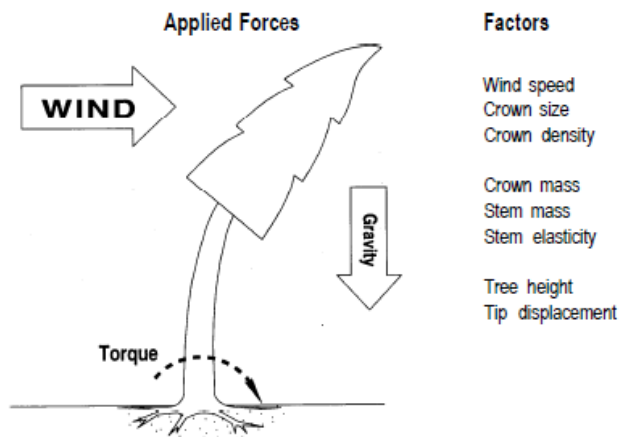


Figura 1.1 Fattori e forze che agiscono su un albero in caso di vento (Stathers et al., 1994)

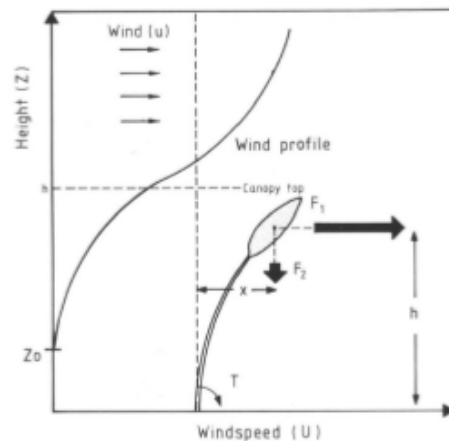


Figura 1.2 Profilo del vento in foresta e forze che agiscono su un albero. F_1 è il vento e F_2 la gravità, che causano il momento torcente T alla base del fusto (Peltola & Kellomäki, 1993)

I fattori che influenzano queste forze, a livello di singolo albero, sono essenzialmente

- Altezza, diametro e forma del fusto
- Classe e dimensione della chioma. La resistenza della chioma dipende molto dalla dimensione dei rami, del fusto esposto al vento. Inoltre, è stato visto che cambia in base alla specie.
- Resistenza ed elasticità del fusto e dei rami
- Caratteristiche dell'apparato radicale

La suscettibilità al vento dipende però anche dalle caratteristiche del popolamento, che influenzano la stabilità a seconda dell'altezza e densità del popolamento, composizione specifica e dei trattamenti selvicolturali.

In figura 1.3 si riporta il grafico che rappresenta l'analisi dei danni, per specie, dopo la tempesta Lothar (1999). È evidente la maggiore suscettibilità all'aumentare dell'altezza dei soggetti arborei e delle conifere (soprattutto l'abete rosso) rispetto alle latifoglie, a causa della permanenza degli aghi durante l'anno. (Gardiner, 2013)

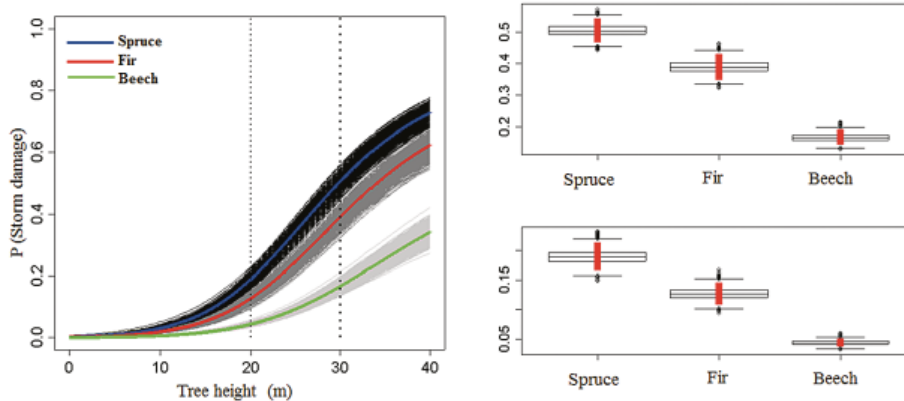


Figura 1.3 Probabilità di danno per diverse specie dalle analisi della tempesta Lothar (Gardiner, 2013)

Anche le caratteristiche del suolo giocano un ruolo importante nella stabilità, in particolare la profondità del suolo, il drenaggio, la struttura, densità, tessitura e pietrosità. Questi elementi condizionano la capacità degli individui arborei di sviluppare apparati radicali profondi e stabili (Stathers et al., 1994).

Ad esempio, quando i suoli sono saturi d'acqua a causa di elevate precipitazioni, diminuisce la coesione e la suscettibilità agli schianti da vento per ribaltamento del piatto radicale è maggiore, come è avvenuto in occasione della tempesta Vaia.

L'orografia del territorio, soprattutto in aree montane, condiziona e modifica fortemente l'esposizione al vento, la direzione, velocità e le turbolenze. Infatti, le morfologie dove il vento agisce con maggiore intensità, a seconda della direzione, sono le colline, creste montuose, i fondivalle (soprattutto in valli più strette) e le selle. Anche nei versanti sottovento possono formarsi turbolenze che favoriscono il verificarsi di schianti.

Gli schianti da vento sono anche fortemente condizionati dalle condizioni meteorologiche come velocità del vento, raffiche, durata della tempesta, umidità del suolo, carico di neve e pioggia sulla chioma. (Stathers et al., 1994).

Molto spesso è difficile capire esattamente quale elemento incide di più sugli eventi di disturbo, perché nella maggior parte dei casi si tratta della combinazione di molteplici cause.

Gli schianti da vento possono avvenire in tre modi:

- Sradicamento o ribaltamento (uprooting) quando l'albero cade al suolo insieme all'apparato radicale a causa del cedimento dell'ancoraggio con il suolo. Ciò può avvenire ad esempio quando il suolo è saturo d'acqua e la coesione del terreno è minore.
- Stroncamento (snapping) quando avviene la rottura del fusto al di sopra del colletto
- Sveltamento quando avviene la rottura del fusto nella metà superiore

Solitamente, nelle situazioni di versante dove i suoli sono generalmente poco profondi, gli alberi tendono a subire maggiori sradicamenti a causa degli apparati radicali meno profondi. Tuttavia, la modalità di schianto è anche legata alla specie arborea, come funzione della tipologia di apparato radicale. Piante con apparato radicale a fittone tendono allo stroncamento mentre piante con apparato superficiale sono più suscettibili al ribaltamento.

Quando avviene lo sradicamento, l'albero schiantato solleva l'apparato radicale con una massa di terreno, creando la tipica micro-topografia locale pit-mound. (Brown, 1976; Lutz, 1940)

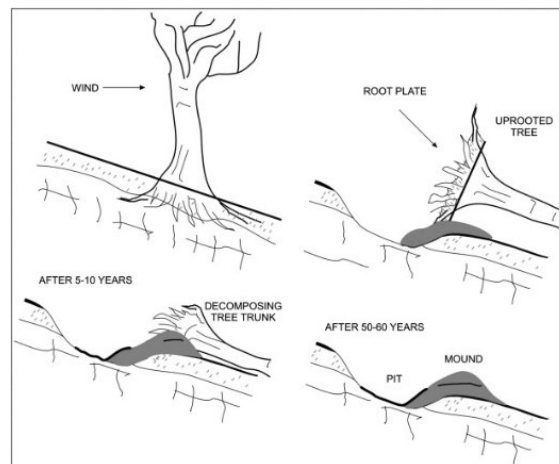


Figure 1.4 Micro-topografia pit e mound in conseguenza di uno schianto da vento (Łukasz Pawlik, 2013)

Le zone dove si formano i mounds (cumuli), dovuti alla decomposizione degli apparati radicali, sono spesso siti favorevoli per la germinazione e lo sviluppo, grazie anche al rimescolamento degli orizzonti del suolo. Inoltre, i pit-mounds favoriscono la creazione di micro-rilievi che aumentano la varietà di composizione specifica.

La porosità e la permeabilità dei suoli disturbati risulta maggiore rispetto ai suoli non disturbati, favorendo lo sviluppo degli individui arborei (Lutz, 1940).

Gli alberi caduti in seguito a disturbi da vento possono diventare elementi che favoriscono la rinnovazione, grazie al microclima che si crea nei pressi del tronco a terra (nurse logs). Ad esempio, l'abete rosso nel piano montano, ma soprattutto nel piano subalpino, riesce a rinnovarsi maggiormente in prossimità di tronchi, radici e sul legno in decomposizione (CWD). (Kupferschmid, 2005). In figura 1.5 è possibile notare che il fenomeno avviene in maniera analoga con i pini.

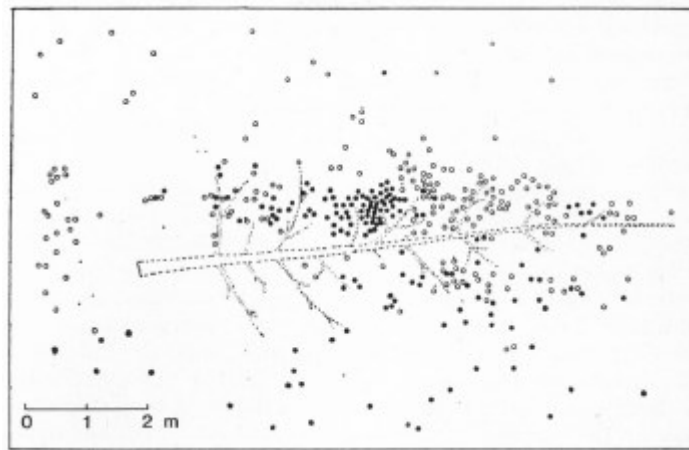


Figura 1.5 Distribuzione di piantine di pino in prossimità della chioma di un *Pinus sylvestris* L. a terra (Kuuluvainen, 1994)

1.1.1 Tempeste da vento

In Europa le tempeste da vento sono responsabili di più del 50% dei danni primari, intesi come danno meccanico agli alberi, alle foreste europee. L'aumento del patrimonio forestale e dell'età media delle foreste in Europa, negli ultimi 60 anni, ha contribuito all'aumento dei danni osservati (Blennow, K. et al, 2010).

Spesso questi eventi, nel continente europeo, si originano da cicloni extra-tropicali che si verificano in autunno-inverno, quando le differenze di temperatura sull'emisfero settentrionale sono più pronunciate e sono talvolta associati a vari tipi di precipitazioni intense come piogge, ghiaccio, grandine o neve (Gardiner et al., 2010).

Questa tendenza viene spesso connessa ai cambiamenti climatici come causa principale. Tuttavia, soprattutto per quanto riguarda le tempeste, è molto difficile dimostrare statisticamente questi aumenti in termini di frequenza e gravità perché le serie storiche di dati sono relativamente brevi e questi eventi sono altamente stocastici (Gardiner et al., 2010).

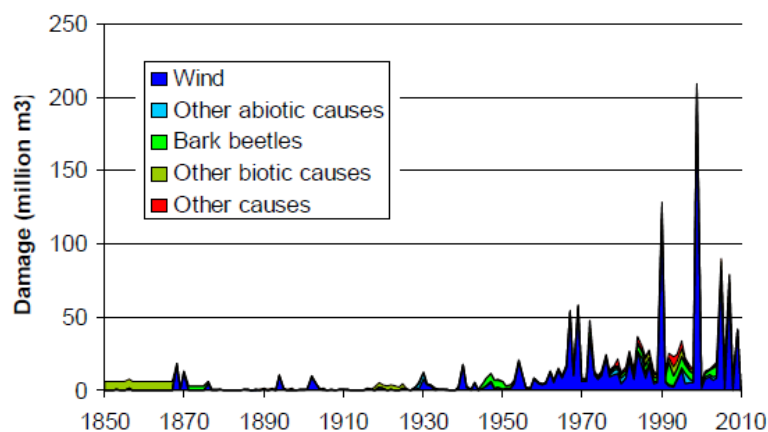


Figura 1.6 Danno totale alle foreste europee (Mm^3) a causa di diversi tipi di disturbo (Schelhaas, 2008)

Una delle principali preoccupazioni degli operatori che si occupano di gestione forestale sono le tempeste, che dal 1950 hanno causato danni crescenti alle foreste, come è possibile vedere in figura 1.6 (Schelhaas, 2003). Ciò si deve probabilmente al fatto che nella prima parte del XX secolo c'è stata una minore frequenza di tempeste catastrofiche, rispetto ai due secoli precedenti. Nei decenni successivi, la sensibilità delle foreste al vento è progressivamente aumentata a causa di nuovi regimi di gestione selvicolturale (aumento delle foreste ad alto fusto, piantagioni artificiali, etc.), nuove aree boscate (rimboschimenti, espansione della superficie forestale) e alle nuove condizioni economiche e ambientali (minore scarsità di legno e aumento della produttività) (Gardiner et al., 2013).

Gli operatori del settore forestale hanno risposto all'aumento dei danni con lo sviluppo di metodi migliori per affrontare le conseguenze, ad esempio con nuovi usi del legname e migliorando il recupero e lo stoccaggio (Jubertie, 2008).

L'esperienza acquisita ha permesso di sviluppare nuovi programmi di ricerca per comprendere meglio le cause e gli effetti dei danni da vento alle foreste e per sviluppare una gestione più efficace (Biro et al, 2009).

In figura 1.8 si osserva che le zone più colpite sono lungo la costa occidentale europea, specialmente nel periodo invernale (Blennow, K. et al, 2010).

In tabella 1.7 si riportano informazioni riguardo ad alcune tempeste che hanno avuto un'area di impatto a livello internazionale ed europeo, a partire dal 1950. In figura 1.9 viene rappresentato l'entità di danno delle tempeste alle foreste europee, per mese dell'anno.

Data evento	Nome	Stati coinvolti	Volume danneggiato (Mm ³)	Vittime	Danno finanziario (M€)
31/01/1953		UK, Paesi bassi, Danimarca	1.8	2100	5.82
21/02-25/05/1967		Rep. Ceca, Germania, Svizzera, Danimarca, Francia, Austria	46.5	60 (Germania)	600 (danno totale)
22/09/1969		Svezia	42.2	16	17.52
13/11/1972		Francia, Germania, Paesi bassi	25 (19 Germania)	54	1 Bn (marchi tedeschi)
16/10/1987		UK, Irlanda, Francia, Norvegia	11.4	18 (UK), 4 (Francia)	30 (UK)

25/01-01/03/1990	Vivian e altri nomi	Regno Unito, Francia, Belgio, Paesi Bassi, Lussemburgo, Germania, Svizzera, Danimarca, Repubblica Ceca, Austria, Polonia, Slovacchia, Svezia, Italia	120	272	12800
24-28/12/1999	Lothar, Martin	Francia, Germania, Svizzera, Danimarca, Polonia, Rep. Ceca, Austria, Lituania, Belgio, Estonia, Spagna, Lettonia, UK, Italia, Portogallo	196.7	>140 (EU), 88 (Francia)	10000 (danno totale), 3000 (danno forestale)
19/11/2004		Slovacchia	5.40		5000-6000€/ha (66 M€ nel Monte Tatra)
7-9/01/2005	Gudrun	Svezia, Lettonia, Danimarca, UK, Estonia, Lituania	77.5	19	1500 (danno totale)
14-18/01/2007	Kyrill	Germania, Svezia, Rep. Ceca, Polonia, Austria, Lettonia, Slovacchia, Lituania, Belgio, Francia, Paesi bassi, Romania	64.5	55 (EU), 13 (Germania), 13 (UK)	5000 (danno totale)
24/01/2009	Klaus	Francia, Spagna	44.6	31	1045 (danno forestale)
27-30/10/2018	Vaia	Italia, Austria, Svizzera	8.5	16 (http://www.nimbus.it/eventi/2018/181031TempestaVaia.htm)	

Tabella 1.7 (Blennow, K. et al., 2010)

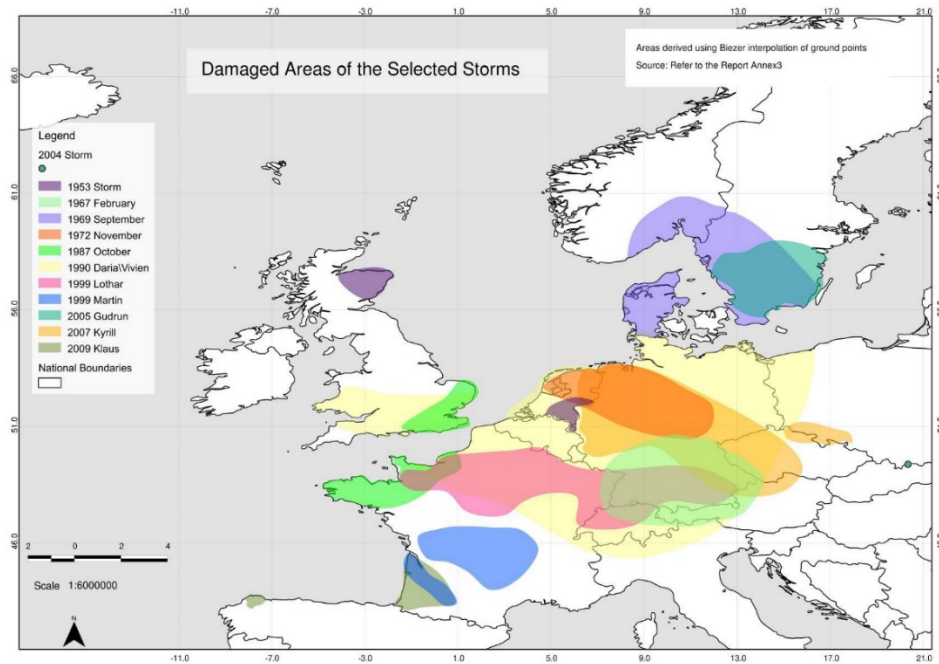


Figura 1.8 Aree colpite dalle principali tempeste di vento dal 1950 (Gardiner et al., 2013)

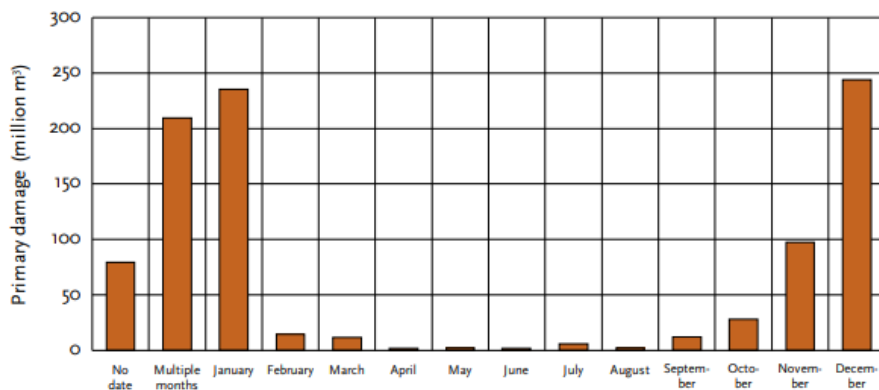


Figura 1.9 Danni causati dalle tempeste alle foreste in Europa per mese dell'anno (Gardiner et al., 2010)

Un caso particolare di tempeste sono le tempeste di ghiaccio. In alcune aree delle Alpi e delle Alpi dinariche, le tempeste di ghiaccio si verificano frequentemente e causano periodicamente danni estesi (Carrière et al., 2000; Nagel et al., 2017).

Questo tipo di eventi sono comunque meno importanti rispetto agli incendi, pullulazioni di scolitidi, neve e vento (Schelhaas et al., 2003).

Dal punto di vista meteorologico il fenomeno si verifica quando correnti d'aria calde e cariche di vapore acqueo sovrastano l'aria fredda vicino al suolo, con temperature al di sotto di 0°C. La formazione di strati di ghiaccio avviene quando le precipitazioni si congelano all'impatto con le superfici. Queste tempeste distruttive avvengono con alte intensità nel nordest degli Stati Uniti, ogni inverno (Lemon, 1961).

Gli alberi manifestano danni quando gli strati di ghiaccio che si formano sui rami sono maggiori di mezzo centimetro. Se questo processo viene seguito da forti venti possono verificarsi facilmente rotture (Lemon, 1961).

I danni più frequenti riguardano dai piccoli ai grandi rami, ma possono verificarsi anche conseguenti rotture e piegature delle chiome, rotture o fratture interne dei fusti e danni all'apparato radicale, favorendo le condizioni predisponenti per sradicamenti (Miller-Weeks et al., 1999).

Un caso recente di tempesta di ghiaccio, che ha colpito la Slovenia e il nord della Croazia, è avvenuto tra l'1 e il 5 febbraio 2014, danneggiando più di mezzo milione di ettari di foreste, quasi metà di tutte le foreste slovene. (Nagel et al., 2016).

In gran parte della zona colpita, sono state registrate precipitazioni superiori ai 100 mm (in alcune zone anche sopra i 200 mm) e accumuli di ghiaccio intorno ai 4-5 cm, anche fino a 8 cm. (Sinjur et al. 2014; Vertacnik et al. 2015). In questo caso il vento non fu un importante elemento di danno dato che non erano stati registrate velocità elevate (Nagel et al., 2016).

In figura 1.10 si può notare uno degli effetti del fenomeno sui popolamenti e sul paesaggio.



Figura 1.10 Foreste in Slovenia colpite dalla tempesta di ghiaccio del 2014

1.1.2 Conseguenze e impatti

Le tempeste da vento normalmente producono numerose conseguenze negative che possono amplificarsi ben oltre l'area effettiva in cui si è verificato l'evento con schianti di popolamenti e dissesti idrogeologici. Spesso le valutazioni degli impatti vengono fatte sulla base delle perdite in termini economici, ma ormai sono riconosciuti anche gli effetti ecologici e sociali.

In figura 1.11 viene riportato uno schema che riassume le dimensioni e le categorie, legate alle foreste, che sono influenzate dalle tempeste da vento in Europa (Romagnoli et al., 2023).

Forest- related dimensions	Forest-related categories
<i>Forest Ecology and Management</i>	Forest ecosystem dynamics
	Forest planning
	Pest and pathogen risk
<i>Forest operations</i>	Forest operations and logistics
	Forest infrastructures
	Environmental impacts
<i>Geomorphology</i>	Channel dynamics
	Slope dynamics
<i>Socio-economic</i>	Economic
	Socio-cultural
<i>Forest Governance</i>	Institutional governance
	Stakeholders and actors' relations

Forest-related dimensions and related categories used in the analysis.

Figura 1.11 Ambiti legati alle foreste influenzati dalle tempeste da vento in Europa (Romagnoli et al., 2023)

Le dimensioni maggiormente colpite dagli impatti delle tempeste sono la gestione forestale e le dinamiche ecologiche, che contano per il 60.7% degli impatti totali. Ciò è dovuto in larga parte dalle conseguenti pullulazioni di scolitidi, ma in misura non meno importante anche dal cambiamento della biodiversità, delle dinamiche di rinnovazione, delle caratteristiche dei suoli e della capacità di stoccaggio della CO₂. Le operazioni forestali contano per il 18.9% in relazione ai cambiamenti delle attività ordinarie e delle operazioni di taglio. Le altre dimensioni che contano minori impatti sono gli aspetti geomorfologici come la stabilità dei versanti, l'aumento della produzione di sedimenti e gli aspetti socio-economici legati ad esempio alle aziende di utilizzazione, al mercato e al settore industriale (Romagnoli et al., 2023).

1.1.3 Tempesta Vaia

Tra sabato 27 e le prime ore di martedì 30 ottobre 2018 l'Italia è stata interessata dagli effetti di una profonda depressione denominata "Vaia" che, soprattutto lunedì 29, ha determinato violentissime raffiche di scirocco, mareggiate, straordinarie onde di marea sull'alto Adriatico, e piogge alluvionali soprattutto sulle Alpi orientali (Chirici et al., 2019).

Dal punto di vista meteorologico, la Tempesta Vaia del 2018 è stato un ciclone extra tropicale. In sintesi, dal punto di vista della dinamica questo evento si può dividere in due parti: nella prima fase tra il 27 e il 28 ottobre 2018 un intenso flusso di correnti di aria umida e calda, provenienti da sud-ovest, ha colpito l'Appennino settentrionale e le Prealpi italiane, andando a generare abbondanti precipitazioni e violenti temporali. Nella seconda fase, che ha messo in crisi soprattutto i territori alpini, a partire dalla mattina di lunedì 29 ottobre si è verificato un rinforzo dei venti sciroccali, che hanno causato raffiche di vento di intensità estrema, superando i 200 km/h.

Sono stati registrati valori di raffica (valore istantaneo riportato a 10 m dal suolo) di 192 km/h sulla cima prealpina del Monte Cesen a 1552 m di quota, 167 km/h registrati sul Monte Verena (Altopiano dei Sette Comuni) a 2002 m di quota, 149 km/h registrati sul Passo Valles (Dolomiti) a 2042 m di quota. Valori molto elevati registrati anche in aree di fondo valle o di altopiano: 141 km/h in Cansiglio, 140 km/h a Perarolo di Cadore, 132 km/h a Caprile e 111 km/h a Santa Giustina Bellunese (Arpav - Maltempo in Veneto: pioggia e vento eccezionali).

In figura 1.12 è possibile osservare l'evoluzione del ciclone durante la sera del 29 ottobre 2018.

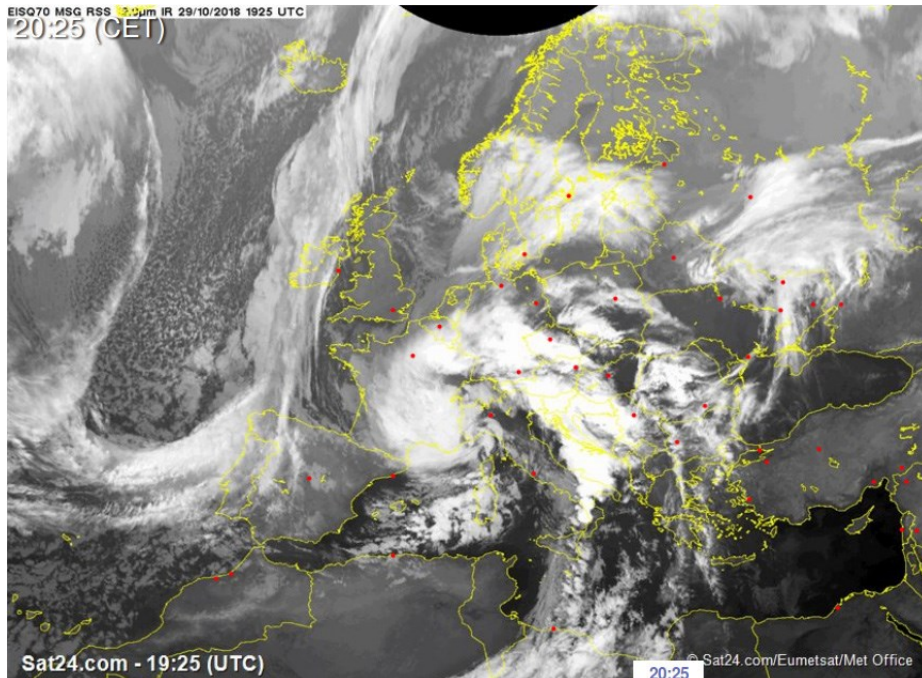


Figure 1.12 La tempesta Vaia alle 20.25 (19:25 UTC) del 29 ottobre 2018, dal satellite Meteosat-11 (fonte: EUMETSAT)

Nella regione Veneto, la pluviometria totale dell'evento è stata meno rilevante sulle zone costiere e sulla pianura meridionale ma è stata decisamente estrema sulle zone montane e in particolare sul

Bellunese. In alcune stazioni del Bellunese e nella seconda fase dell'evento sono state registrate precipitazioni di 30-50 mm/h e i quantitativi di precipitazione registrati nell'intervallo tra 1 e 4 giorni costituiscono record assoluti, almeno dal 1992 (anno di attivazione della rete di monitoraggio Arpav). (Arpav - Maltempo in Veneto: pioggia e vento eccezionali).

Si arriva infatti fino al massimo di 715.8 mm/96h registrato a Soffranco (Val zoldana, Provincia di Belluno), che rappresenta il record assoluto in Veneto (Centro Funzionale Decentrato – Relazione evento 27/10/2018 – 01/11/2018).

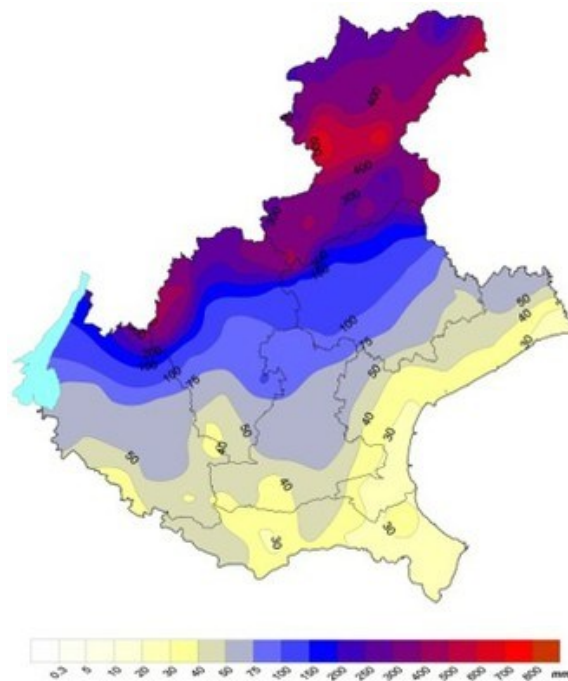


Figure 1.13 Precipitazioni (mm) cadute in Veneto tra il 27 e il 30 ottobre 2018 (Arpav - Maltempo in Veneto: pioggia e vento eccezionali)

Diffusamente sul territorio veneto sono stati registrati allagamenti, frane e smottamenti, schianti di alberature e di formazioni forestali, danni da vento a linee elettriche e ad abitazioni.

Per quanto riguarda i danni alle foreste, la tempesta Vaia ha interessato 494 Comuni, per un territorio complessivo di 2.306.968 ha. La copertura del suolo è soprattutto a bosco, pari a 1.399.483 ha, che corrisponde a oltre il 60% della superficie territoriale dei Comuni interessati.

Le formazioni forestali maggiormente colpite sono peccete, piceo-abieteti e piceo-abieto-faggeti. L'area nella quale sono stati riscontrati danni consistenti o la completa distruzione del bosco sono pari a 42.525 ha, per un totale di circa 8.5 milioni di m³ di legname a terra (Chirici et al, 2019).

In figura 1.14 è rappresentata la percentuale di superficie forestale danneggiata nei comuni del nord Italia.

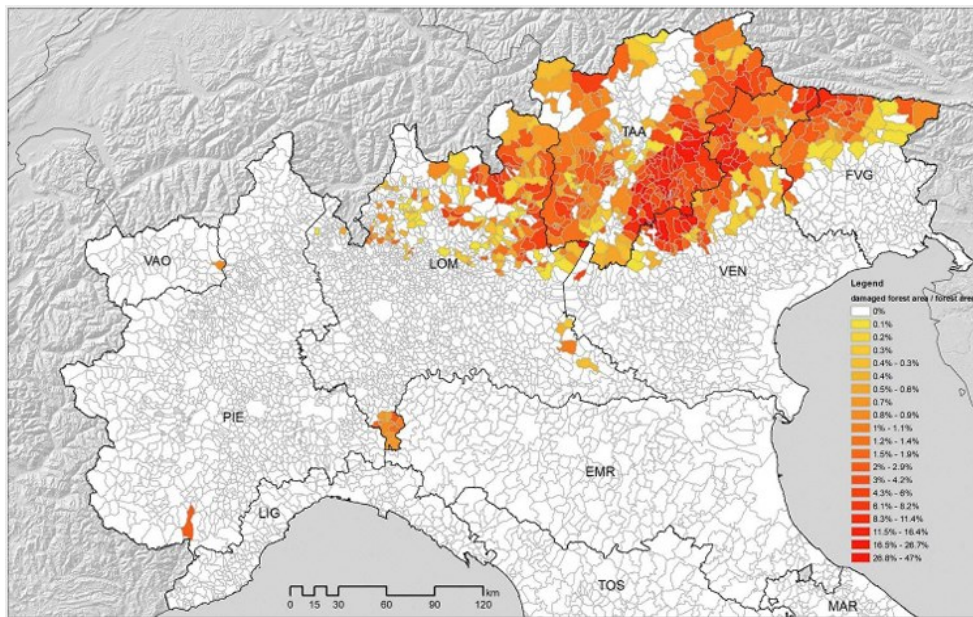


Figure 1.14 Percentuale di superficie forestale distrutta dalla tempesta Vaia, per comune (Chirici et al, 2019)

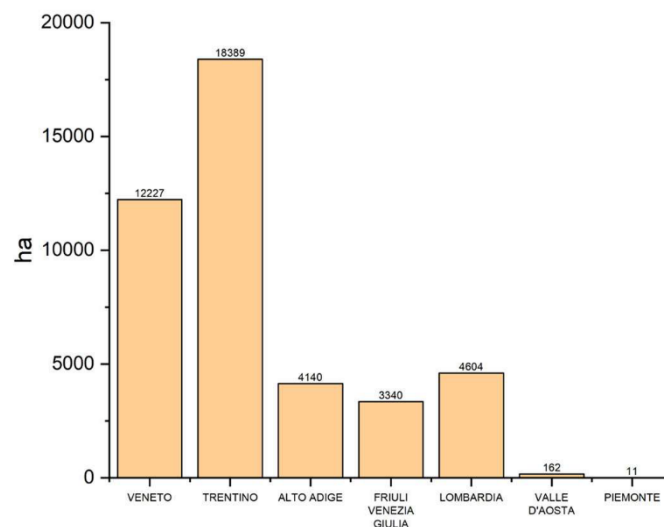


Figure 1.15 Estensione delle foreste danneggiate dalla tempesta Vaia. Valori in ettari (Chirici et al, 2019)

La tempesta Vaia ha comportato la gestione di numerose problematiche, tra cui lo sgombero del legname schiantato, la protezione dal rischio idrogeologico di fenomeni franosi, valanghivi e di colate detritiche.

Una delle conseguenze che ha comportato questo tragico evento è la riproduzione di massa del bostrico tipografo (*Ips typographus*), favorita dall'elevata presenza di abete rosso schiantato. Si sta

infatti sviluppando la più ampia infestazione mai osservata sulle Alpi meridionali, che sta costituendo un'ulteriore perdita di risorse forestali, che fanno parte di un paesaggio che è un patrimonio culturale e naturalistico di valore inestimabile.

Le piante sopravvissute alla tempesta sono estremamente vulnerabili all'attacco dell'insetto, in parte perché indebolite e in parte per la grande pressione dell'insetto (fase epidemica) (Regione Veneto, 2023).

1.2 Foreste di protezione

Da secoli in Italia le autorità territoriali individuavano, soprattutto nei territori montani, foreste con lo scopo di difesa da pericoli naturali come valanghe e caduta massi. Queste aree erano soggette a particolari regole per evitare parzialmente o totalmente l'utilizzazione e venivano chiamate tradizionalmente boschi "banditi" o "vizze". Storicamente, la prima legge che in Italia riconobbe la funzione protettiva delle foreste fu la legge Serpieri (Regio Decreto nr.3267 del 1923) (Del Favero, Lingua, Pividori, 2019).

Tutt'ora le foreste montane svolgono un'importante funzione di protezione e contribuiscono a limitare il rischio per le attività umane, turismo e trasporto, derivante dai pericoli naturali.



Figura 1.16 Bosco di protezione. Nella parte sinistra del versante il bosco ha un'elevata protezione potenziale mentre al centro c'è ancora una zona di potenziale distacco valanghivo. Fonte: Frehner M. et al., 2005



Figura 1.17 Frane superficiali (Sachseln OW, 15 agosto 1997) fonte: Frehner M. et al., 2005

La funzione di protezione dei boschi può essere suddivisa in 2 categorie: funzione protettiva indiretta e diretta.

- Funzione di protezione indiretta è generalmente svolta da tutti i popolamenti forestali e riguarda la conservazione del suolo dall'erosione e la regimazione delle acque.
- Funzione di protezione diretta è nei confronti dei pericoli naturali come valanghe, caduta massi, frane e colate detritiche. A questo scopo la foresta agisce come difesa attiva, per evitare e limitare l'insorgere del fenomeno e come difesa passiva per mitigarne l'effetto.

La "funzione di protezione diretta" della foresta è determinata dalla presenza umana, che la rende in grado di proteggere direttamente le persone, le attività e gli interessi dell'uomo. Questa funzione si basa su tre elementi chiave: la presenza di pericoli naturali, la presenza di una copertura forestale che impedisce o mitiga tali pericoli, e la presenza umana con insediamenti, attività economiche e vie di comunicazione (Berretti et al., 2006).

In condizioni di assenza di disturbi causati dall'attività umana o da variazioni climatiche naturali, l'ecosistema forestale di montagna mostra una stabilità ecologica. Questa stabilità si riferisce all'intero ecosistema, consentendo la sua perpetuazione, ma è relativa nel contesto del tempo e dello spazio (Levin, 1992; Peterson et al., 1998).

Le dinamiche naturali che colpiscono gli ecosistemi naturali spesso però non soddisfano le esigenze di protezione costante e continua di cui l'uomo necessita. Queste necessità sono in contrasto con la

naturale ciclicità delle foreste naturali, dove l'alternarsi della copertura e della struttura sono fortemente variabili. Perciò, la protezione diretta richiede popolamenti forestali con specifiche caratteristiche, come composizione, densità e stratificazione, in base ai pericoli naturali di cui si vuole ottenere la difesa. Il mantenimento efficace e sostenibile di questa protezione richiede trattamenti selvicolturali continui e mirati (Dotta e Motta, 2000).

In base al livello di rischio, i boschi di protezione diretta possono essere classificati in (Motta, 1998):

- **Fondamentale:** Questa categoria riguarda i boschi che forniscono protezione a insediamenti permanenti, vie di comunicazione tra insediamenti permanenti, aree industriali, stazioni turistiche estive e invernali, e comprensori sciistici.
- **Media:** Questa categoria è associata ai boschi che proteggono abitazioni stagionali, vie di comunicazione tra abitazioni permanenti e stagionali, zone agricole e tralicci per il trasporto dell'energia elettrica.
- **Secondaria:** Questa categoria riguarda i boschi che forniscono protezione a pascoli, aree vicine ad insediamenti permanenti o stagionali poco frequentate durante l'inverno.

1.3 Interventi Post-disturbo

La gestione post-disturbo nelle foreste europee rappresenta la fase successiva alla tempesta. Quando le conseguenze di un disturbo hanno un elevato impatto sui territori, le amministrazioni locali si devono occupare di diversi obiettivi. Dal punto di vista strategico, i paesi che in Europa hanno forti economie forestali e che sono frequentemente colpiti da disturbi da vento, si occupano di:

1. **Sicurezza:** La sicurezza della popolazione generale e degli operatori forestali è la massima priorità. Dopo un evento di tempesta, la rimozione di alberi abbattuti dovrebbe concentrarsi sulla sicurezza delle persone e sulla riapertura di strade e linee elettriche per prevenire incidenti e agevolare l'accesso a squadre di soccorso e recupero.
2. **Identificazione dell'estensione del danno:** È fondamentale identificare rapidamente l'estensione del danno e le aree interessate per sviluppare strategie di risposta adeguate. Questo include la stima accurata del volume di legname danneggiato e la comunicazione tempestiva con le autorità forestali per valutare l'entità dell'evento.

3. **Mitigare l'alterazione del mercato:** Si raccomanda di mantenere il legname abbattuto in foresta il più a lungo possibile per evitare un'eccessiva offerta sul mercato. La temporanea restrizione dell'abbattimento regolare a livello nazionale è comune per mitigare l'eccesso di offerta. Inoltre, si consiglia di mettere sul mercato per primo il legname di alta qualità e di negoziare prezzi equi e termini di accordo.
4. **Mantenimento dell'effetto protettivo:** In alcune condizioni, come nelle foreste di protezione o nelle aree di conservazione, è importante mantenere o ripristinare rapidamente l'effetto protettivo della foresta contro pericoli naturali di tipo gravitativo.
5. **Conservazione e promozione della biodiversità:** Le decisioni di gestione post-disturbo, come il recupero o la non-raccolta, possono influenzare a lungo termine i mercati del legname e la biodiversità forestale. La conservazione della biodiversità spesso beneficia della conservazione di almeno alcuni alberi danneggiati (Sanginés de Cárcer et al., 2021).

Nell'ambito della gestione del materiale legnoso schiantato, nascono diverse questioni e dibattiti relativi alle azioni più idonee da attuare. Alcuni problemi importanti si pongono spesso in quelle aree dove risiedono le foreste di protezione, che di frequente sono situate in aree complicate, ad esempio dove manca un'adeguata viabilità o dove la pendenza è molto elevata.

Ad esempio, in Svizzera, in seguito alle tempeste invernali Lothar (1990) e Vivian (1999) che colpirono severamente le foreste montane di protezione, nacque un controverso dibattito su come gestire grandi superfici forestali abbattute dal vento (Schönenberger 2002a).

Al fine di ridurre gli elevati rischi derivanti dai pericoli naturali nelle foreste di protezione, solitamente si procede, in primo luogo, rimuovendo il materiale legnoso schiantato. Successivamente, si esegue il re-impianto di alberi e/o vengono installate opere ingegneristiche come reti ferma neve, reti paramassi, ponti da neve, rastrelliere o treppiedi, specialmente in luoghi dove la foresta proteggeva infrastrutture viarie e abitazioni.

Un'alternativa a queste operazioni è il rilascio del materiale schiantato in situ (non intervento), che fornisce una temporanea funzione di protezione nei confronti dei pericoli naturali come valanghe e caduta massi.

In figura 1.18 sono riportati schematicamente gli sviluppi dell'effetto protettivo in aree schiantate di foreste montane dopo differenti opzioni di gestione.

- a) Salvage logging e rinnovazione naturale
- b) Salvage logging e opere permanenti in acciaio
- c) Salvage logging, costruzione temporanee in legno e piantumazione

- d) Salvage logging e piantumazione
- e) No salvage logging (no intervention)
- f) No salvage logging (no intervention) e piantumazione

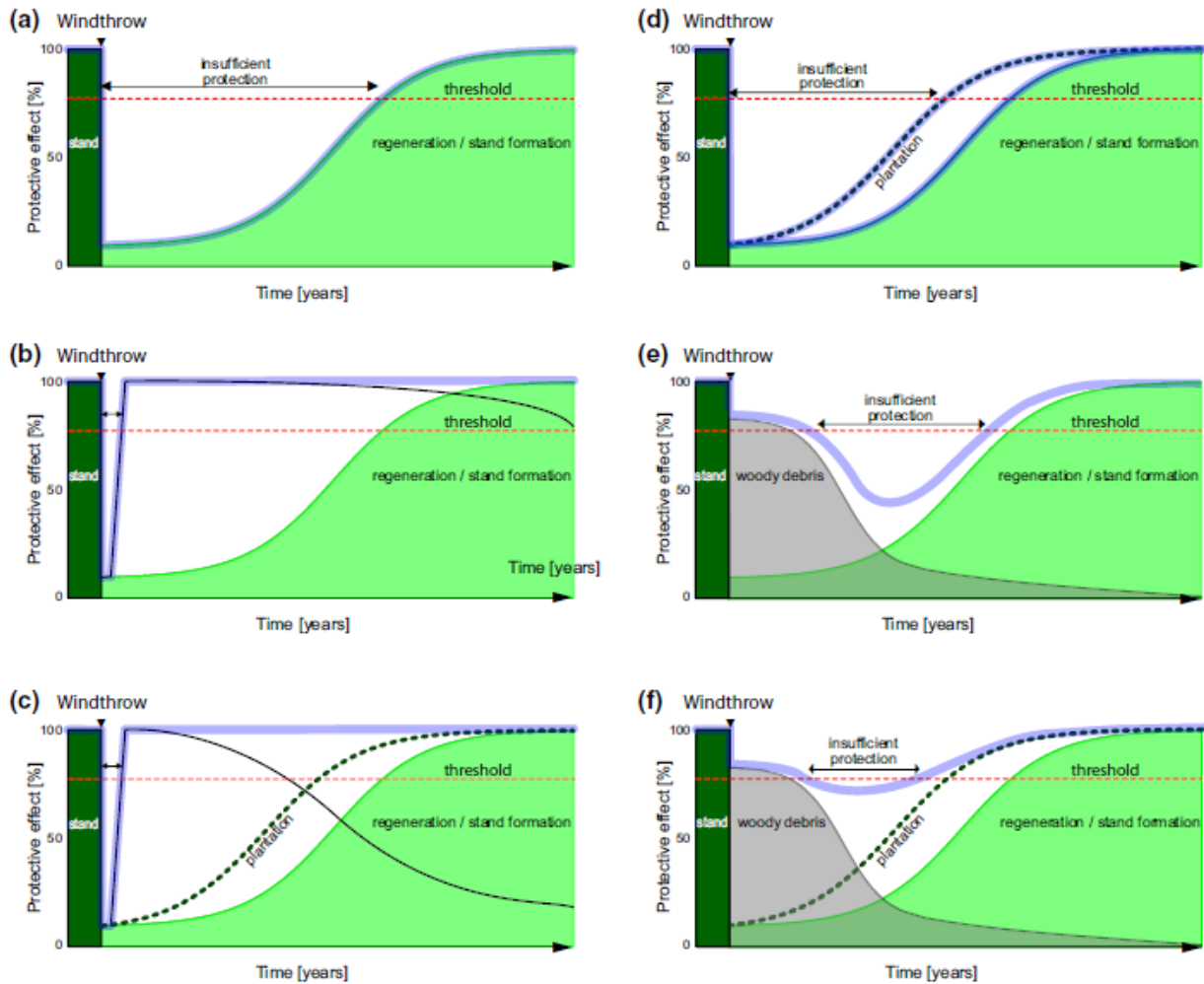


Figura 1.18 Sviluppo schematico dell'effetto protettivo (blu) nelle aree abbattute dal vento delle foreste di montagna dopo trattamenti diversi (Wohlgemuth, Schwitter, Bebi, Sutter, & Brang, 2017)

1.3.1 Salvage logging

Il salvage logging è una opzione che comporta la rimozione di tutto il legname danneggiato dalla tempesta, modificando chiaramente l'aspetto dell'area colpita. Le caratteristiche tipiche di un soprassuolo con materiale schiantato, come la complessità strutturale, la ridotta accessibilità, la copertura del suolo e la presenza di microstrutture e legno morto o in decomposizione, vengono eliminate durante le operazioni di rimozione del legname. Anche in caso di completa rimozione del

legname, all'interno della superficie boschiva rimangono comunque importanti quantità residue di legno. Spesso, per garantire un accesso minimo, il legname lasciato in loco, come ceppaie, parti legnose basali, cimali o ramaglia, viene depezzato o raggruppato ed ammucciato in cataste o fascine (UFAM, 2008).



Figura 1.19 Salvage logging in aree colpite dalla Tempesta Vaia sull'altopiano della Vigolana (Trentino); fonte: www.ildolomiti.it

Questa scelta avviene in virtù del fatto che il valore di mercato del legname danneggiato dalla tempesta può essere pari a quello del legname raccolto in modo convenzionale, purché venga utilizzato prima di una significativa riduzione della qualità del legno. Generalmente, gli introiti dei proprietari forestali derivanti dalla vendita del legname schiantato sono minori a causa dell'elevata quantità rese disponibili. Talvolta, i costi relativi al recupero del materiale superano il valore del legno.

Queste operazioni sono molto spesso complicate a seconda della situazione, richiedono personale con adeguata formazione e qualificato, macchine come harvester e gru a cavo, infrastrutture come piazzali di deposito, il recupero e il miglioramento della viabilità (Gardiner et al., 2013).

Raccogliere il materiale abbattuto è un modo efficace per rallentare la proliferazione degli insetti scolitidi, un aiuto significativo considerando che le pullulazioni di solito si verificano dopo le tempeste da vento, come accaduto nei tempi recenti dopo la tempesta Vaia.

Dal punto di vista ecologico, la pratica del salvage logging può creare squilibri alla naturale ciclicità dei popolamenti forestali. Secondo una review di Anders Taerøe et al., 2019, più della metà degli

studi ha riscontrato che il salvage logging modifica le successioni spingendo le foreste verso fasi di successione più precoce, con periodi più lunghi dominati da specie pioniere.

Ad esempio, nel Parco nazionale della foresta bavarese, nelle aree dov'era stato praticato il salvage logging la probabilità di sopravvivenza degli individui di *Picea abies* diminuiva rapidamente nei primi vent'anni, mentre nelle aree intatte la probabilità di sopravvivenza era decisamente superiore. Nelle aree ripulite, 5 anni dopo la tempesta, era stato rilevato un numero esponenziale di giovani alberi (> 1m) di Betulle (*Betula pendula* Roth. and *B. pubescens* Ehrh) rispetto alle aree intatte, che hanno avuto un picco, con meno della metà degli individui a ettaro osservati nelle aree ripulite, 10 anni dopo l'evento. Quindi, la struttura risultante nei popolamenti forestali rinnovati risulta diversa (Fischer A., Fischer H.S., 2012).

Alcuni studi hanno riportato che il salvage logging rallenta il recupero delle foreste danneggiate rispetto al non intervento. In alcuni casi è stato osservato che il salvage logging ha comportato un recupero più lento a causa della competizione con la vegetazione al suolo o dell'interferenza della fauna selvatica, rispetto a siti dove non c'erano stati interventi (Anders Taerøe et al., 2019).

La densità di rinnovazione può risultare minore nelle aree ripulite a causa della distruzione dei giovani alberi durante le operazioni di recupero del materiale (Močálov and Lässig, 2002).

Questo però dipende molto anche dall'abbondanza di rinnovazione avanzata, cioè che era presente prima del disturbo e che è sopravvissuta, e anche come vengono effettuate le operazioni di esbosco. Nelle foreste canadesi della Nuova Scozia, è stato osservato che c'era maggiore abbondanza di semenzali nelle aree ripulite rispetto a quelle non ripulite e le altezze medie di tutte le specie erano maggiori, a causa del maggiore spazio di crescita e del migliore strato di germinazione dato dalla perturbazione del suolo (Taylor R. A. et al., 2017).

Il salvage logging comporta il disturbo del suolo e della vegetazione favorendo l'insediamento immediato di giovani piante. Tuttavia, nelle fasi successive, le aree così trattate offrono però meno nicchie e micro-siti per la nuova rinnovazione, rispetto alle aree dove non ci sono interventi (Schönenberger, 2002).

Dal punto di vista dell'effetto protettivo, il recupero del materiale schiantato può comportare l'aumento del pericolo di distacco di valanghe o di caduta massi rispetto a siti non ripuliti. L'effetto di protezione di un sito sgomberato potrebbe essere simile a quello di un popolamento in piedi (Schönenberger et al., 2005).

1.3.2 No intervention

Il non intervento è una scelta gestionale che comporta il rilascio del materiale schiantato in bosco, tranne per piccoli interventi di urgenza o per la salvaguardia delle infrastrutture, come vie di comunicazione o abitazioni. In questo caso il proprietario non dovrà sostenere rilevanti costi che comporterebbero queste operazioni. Ciò avviene soprattutto in aree dove l'accessibilità è complicata o assente, dove non sussiste rischio per le infrastrutture o dove non c'è convenienza tra costi e benefici.

La scelta del non intervento implica diverse caratteristiche ecologiche differenti dalle aree trattate a salvage logging. Negli anni successivi al disturbo, la quantità di legno morto (dead wood) è notevolmente maggiore e aumenta la disponibilità di luce e umidità favorendo maggiore mineralizzazione del suolo forestale (Hume et al., 2017).

Sulla maggior parte delle aree con schianti da vento e non sgomberate, il legname costituisce inizialmente una barriera molto efficace contro i movimenti della neve grazie alle strutture superficiali come i fusti sovrapposti e le ceppaie. Queste formano una forte eterogeneità e rugosità sopra il terreno, favorendo la stabilizzazione del manto nevoso e la difesa molto efficace contro la caduta massi.

Questo effetto può essere più o meno accentuato in base anche alla direzione in cui sono disposti i fusti schiantati. Quando essi sono disposti in direzione più o meno analoga alle curve di livello, la protezione è migliore rispetto a tronchi collocati in direzione parallela al pendio.

Nei versanti con pendenze fino a 40° , il materiale a terra mitiga il potenziale distacco di valanghe. Mentre, per pendenze maggiori e per elevate altezze del manto nevoso, possono anche verificarsi movimenti del materiale schiantato o potenziali distacchi (Frehner M. et al., 2005).

In figura 1.21 vengono illustrate soglie di stabilità del manto nevoso in funzione della pendenza del terreno e dell'altezza utile del legname rilasciato al suolo.

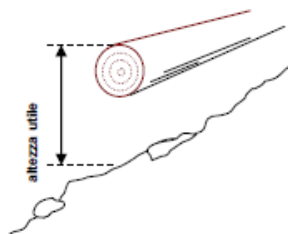


Figura 1.20 L'altezza efficace è l'elevazione media del punto superiore dei tronchi, misurata verticalmente rispetto al terreno (UFAM, 2008)

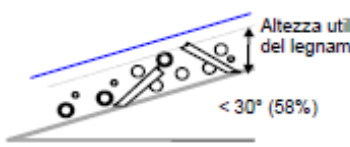
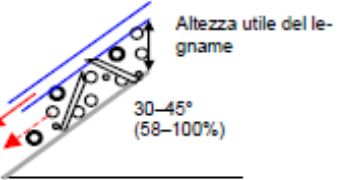
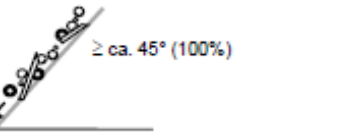
Situazione	Descrizione
<p>1</p> 	<p>Con pendenze fino al 30° (58%) non bisogna temere il distacco di valanghe neppure se gli spessori della neve superano l'altezza efficace del legname di oltre 50 cm. Al di sotto dei 1200 m s.l.m. questa pendenza critica si situa attorno ai 35° (70%).</p>
<p>2</p> 	<p>Con pendenze superiori ai 30° (58%) inizia la serie di valori per cui, con una copertura di neve fresca che supera di 50 cm l'altezza utile del legname, sono da prevedere distacchi di valanghe. In casi simili lo strato di scorrimento della valanga si trova al di sopra dell'altezza utile del legname. Le ricerche eseguite da FREY e THEE (2002) su pendii di 40° (85%) hanno mostrato che ancora 10 anni dopo gli schianti dovuti alla tempeste, i tronchi giacenti possono resistere alle sollecitazioni esercitate da un carico di neve che si verifica ogni 30 anni.</p>
<p>3</p> 	<p>In caso di pendenze ancora più ripide, lo strato di legname è talmente instabile al punto da mettersi in movimento anche senza un'ulteriore pressione della neve. A partire da pendenze superiori a circa 50° (120%) la neve si scarica progressivamente dai pendii, impedendo in tal modo la formazione di valanghe importanti.</p>

Figura 1.21 Stabilità del manto nevoso in funzione della pendenza del terreno e dell'altezza utile del legname al suolo (UFAM, 2008)

In Svizzera, per un periodo di 10 anni dopo la tempesta Vivian, sono stati effettuati monitoraggi sul distacco di valanghe e sono state rilevate attività valanghive in aree ripulite adiacenti a delle aree non ripulite, dove non si sono verificati distacchi (figura 1.22) (Frey and Thee, 2002).

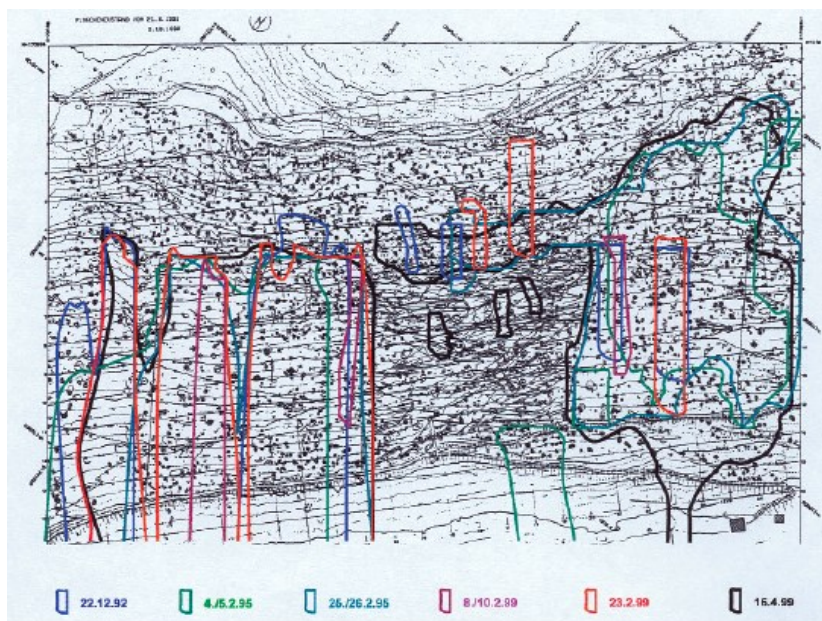


Figura 1.22 Mappa delle principali valanghe verificatisi tra il 1991 e il 2001 in aree sottoposte a salvage logging e aree senza interventi (parte centrale in basso) (Frey and Thee, 2002)

Questo effetto di protezione si riduce comunque col passare degli anni a causa dell'abbassamento dei tronchi e della decomposizione del legno (Frehner M. et al., 2005).

In 25 anni di esperimenti, è stato notato che questo effetto di protezione diminuisce fino ad una presunta fase critica, durante il quale la rinnovazione forestale sostituisce in maniera crescente l'effetto protettivo del legname al suolo (figura 1.23). Questo processo però spesso risulta troppo lento e tende a formare un gap temporale di protezione insufficiente (Wohlgemuth et al., 2017).

Questa situazione rappresenta in maniera schematica il contesto su cui si è lavorato in questa tesi.

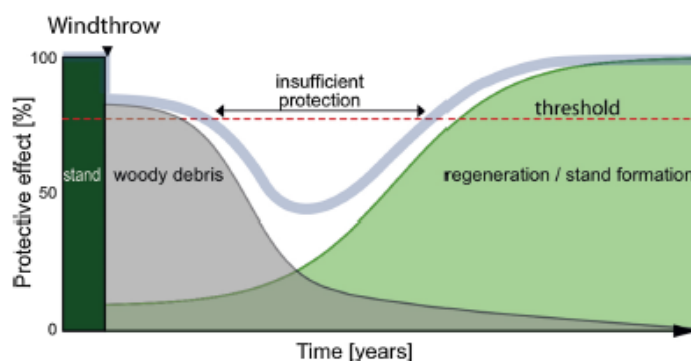


Figura 1.23 Sviluppo dell'effetto protettivo di una foresta montana che successivamente viene colpito da tempesta (Wohlgemuth et al., 2017)

Attualmente in letteratura sono disponibili pochi dati sui movimenti del materiale schiantato e sulla decomposizione del legno ai fini di determinare, in maniera più oggettiva, l'effetto di protezione di un'area schiantata.

In tal senso, in Svizzera sono stati effettuati monitoraggi nell'area sperimentale "Schwanden" dove tra il 1990/91 e il 1993 sono stati registrati i movimenti di 200 elementi tra fusti, ceppaie e ceppaie sradicate (Frey et al., 1995):

- Movimento medio in direzione orizzontale da 5 a 10 cm
- Movimento medio in direzione verticale di 10 cm
- Movimento massimo in direzione verticale di 100 cm

Gli autori comunque sottolineano che, dopo la tempesta Vivian (1990), i primi 5 inverni sono stati moderatamente nevosi.

In altre aree sperimentali, come Cavorgia/ Disentis (Svizzera), è stato monitorato il movimento dei tronchi, con il risultato che essi si sono mossi in media di 20 cm/anno tra il 2001 e il 2010 (secondo decennio dopo la tempesta Vivian), rilevando un aumento del 50% rispetto al decennio precedente (Bebi et al., 2015).

Sempre nell'area Disentis, le altezze medie dei tronchi a terra di abete rosso (*Picea abies*) dal terreno sono variate da 2.1 m (nell'anno dopo la tempesta Vivian) a 1.3 m, 10 anni dopo il disturbo. 20 anni dopo la tempesta invece le altezze risultavano di 0.8 m (Wohlgemuth et al., 2017).

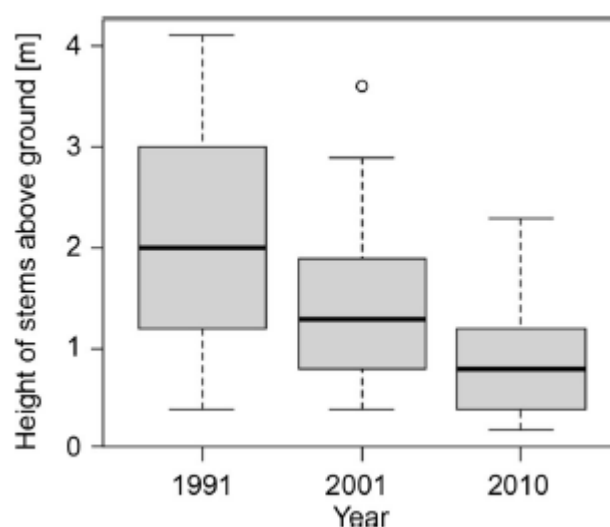


Figura 1.24 Altezza dei tronchi a terra dal terreno dopo la tempesta Vivian (1990) a Disentis, Svizzera (Wohlgemuth et al., 2017)

2 OBIETTIVI

Con il presente lavoro di tesi si intende analizzare come si comporta il materiale legnoso schiantato, in particolare i tronchi, in seguito alla tempesta Vaia del 2018.

Lo scopo è anche quello di poter aumentare il dataset di osservazioni di spostamento orizzontale e verticale in aree schiantate dove il materiale legnoso è stato lasciato a terra. Questo per valutare la funzione protettiva nel tempo di aree schiantate contro pericoli naturali.

In Svizzera, in seguito alla tempesta Vivian del 1990, le amministrazioni locali hanno dovuto mettere in atto delle azioni per la gestione delle foreste montane di protezione che precedentemente offrivano protezione contro i pericoli naturali. Da questo nacquero dei dibattiti sulle modalità di gestione, soprattutto per le aree con altitudini superiori a 1200-1500 m s.l.m., dove la stagione vegetativa e le condizioni di crescita sono più limitanti (Schönenberger, 2002a).

Anche nelle regioni alpine italiane colpite dalla tempesta Vaia si verificarono queste problematiche e spesso le soluzioni adottate, per sostituire la protezione che era offerta dalle foreste, sono state la costruzione di opere ingegneristiche e/o la piantumazione, specialmente per la difesa delle vie di comunicazione e delle abitazioni (figura 2.1 e 2.2).

Lo studio di questi fenomeni può dare un supporto futuro nella gestione delle aree schiantate, in particolare nella scelta se effettuare il recupero del materiale a terra o se non fare interventi.



Figura 2.1 Reti paramassi a valle e reti fermaneve a monte di un versante trattato a salvage logging, in seguito alla tempesta Vaia, nel comune di Livinallongo del Col di Lana (BL) - 2023



Figura 2.2 Terrapieno in costruzione, in seguito alla tempesta Vaia, nel comune di Rocca Pietore (BL) a protezione delle abitazioni a valle - 2023

Un altro obiettivo è osservare se i movimenti della biomassa a terra sono condizionati dalle precipitazioni nevose e capire se elevate altezze del manto nevoso possono causare maggiori movimenti, soprattutto riguardo l'abbassamento. Capire se esiste una relazione tra queste variabili in una certa area può supportare nel definire la capacità di protezione dai pericoli naturali e come questa può variare negli successivi ad un disturbo da vento.

Le poche informazioni presenti in letteratura riguardo a questi fenomeni sono ad esempio le ricerche svolte in Svizzera in seguito alla tempesta Vivian e Lothar. A questo proposito Bebi et al., 2015 avevano studiato l'altezza dei tronchi a terra, la loro dislocazione e altre variabili per valutare la funzione protettiva delle aree colpite dalla tempesta Vivian del 1990.

In base a queste analisi si auspica di fornire un quadro generale dell'evoluzione che subisce la biomassa a terra nelle aree "no intervention", per poter supportare e definire in maniera più oggettiva un grado di protezione e quanto questo può cambiare nel tempo.

3 MATERIALI E METODI

A partire dal 2019 sono state identificate due aree studio per il monitoraggio della funzione protettiva offerta dal legname lasciato a terra denominate Franza e Col di Lana, localizzate nella provincia di Belluno, all'interno del comune di Livinallongo del Col di Lana. Nelle aree studio sono stati effettuati dei rilievi fotogrammetrici per ottenere delle ortofoto e dei modelli digitali di elevazione ad alta risoluzione. Nell'area studio Franza sono stati effettuati rilievi continuativi ogni anno dal 2019 al 2023, mentre nell'area Col di lana sono stati effettuati due rilievi: nel 2020 e nel 2022. All'interno di ciascuna area di studio sono stati individuati delle sotto-aree (5 plot in ciascuna area) per analizzare accuratamente lo spostamento dei tronchi a terra, i quali sono stati identificati disegnando delle polilinee, in ciascun anno di rilievo. Nell'area Franza sono stati identificati 71 tronchi mentre nell'area Col di lana sono stati identificati 87 tronchi.

Per osservare l'abbassamento dei tronchi è stato calcolato il CHM (Canopy Height Model) tramite la differenza tra i DSM, ottenuti dai rilievi fotogrammetrici, e il DTM della Regione Veneto del 2019. Quest'ultimo è stato mantenuto assumendo che non ci siano state sostanziali variazioni del terreno, come infatti è stato osservato.

3.1 Inquadramento aree di studio

Il territorio agordino è situato a nord della Regione Veneto, nei confini della provincia di Belluno, e conta una superficie complessiva di 660 km². A ovest confina con la provincia autonoma di Trento e a nord con la provincia autonoma di Bolzano. All'interno sono presenti 16 comuni, quello più a sud è il comune di Gosaldo e quello più a nord il comune di Livinallongo del Col di Lana. Il corso d'acqua principale è il torrente Cordevole, che ha un orientamento N-S fino a Caprile, mentre più a nord assume un orientamento ENE-WSW.

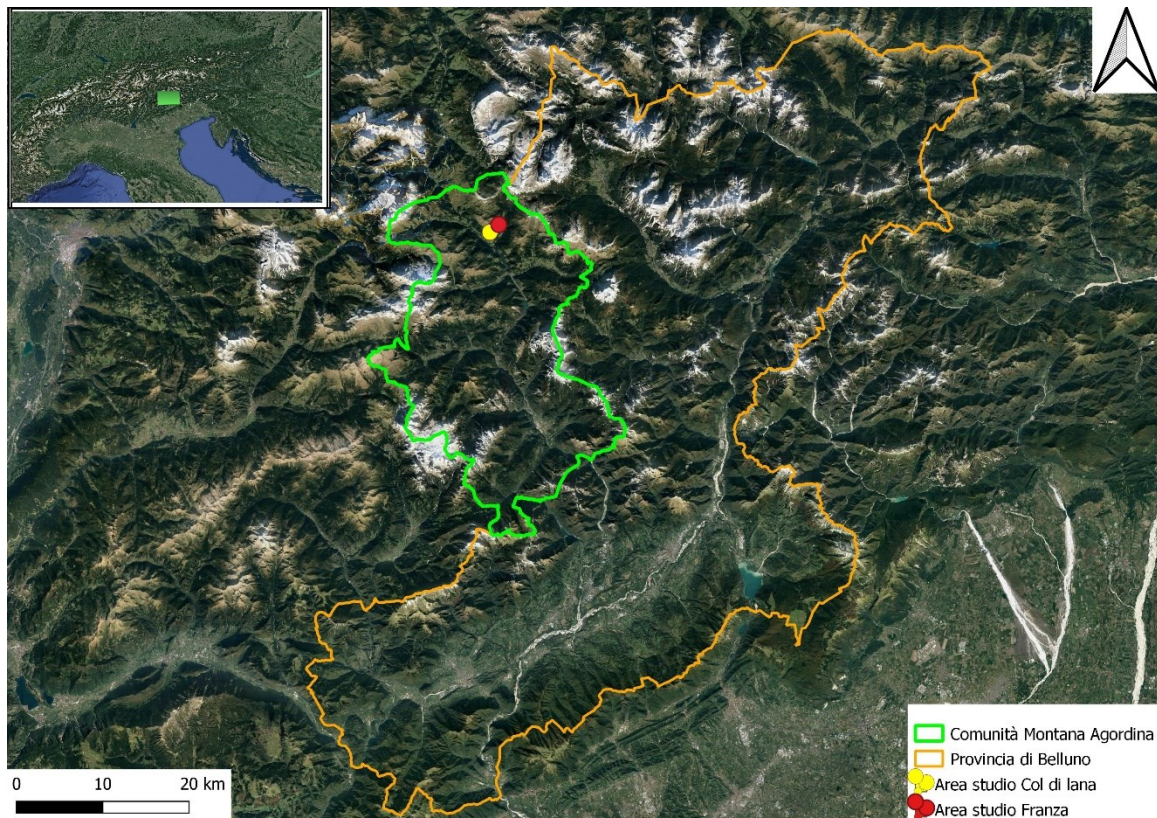


Figura 3.1 Inquadramento della Comunità montana Agordina

Dal punto di vista climatico, l'area è soggetta in gran parte ad un clima temperato fresco nelle zone di fondovalle (tra i 500 e 1200 m), temperato freddo nella fascia fra i 1200 e 1800 m. Al di sopra di queste quote abbiamo clima freddo che caratterizza le altitudini fino ai 2500 m e clima glaciale oltre i 2500 m di quota.

Dal punto di vista pluviometrico, l'area risente dell'effetto barriera prodotto a sud delle Dolomiti Bellunesi, che intercettano le correnti d'aria umide provenienti dal Mar Mediterraneo, dando luogo ad un massimo pluviometrico di 1600 mm.

Nelle aree più a nord il clima è tipicamente più endalpico, con valori di precipitazione minori, intorno ai 1000 mm annui dell'Alto Agordino. In figura 3.2 si può notare la differenza di precipitazioni medie mensili tra il comune di Agordo e il comune di Colle Santa Lucia, quest'ultimo influenzato da clima più endalpico. Le temperature medie annue all'interno del territorio agordino variano fra $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un gradiente termico di $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Barbi et al., 2013).

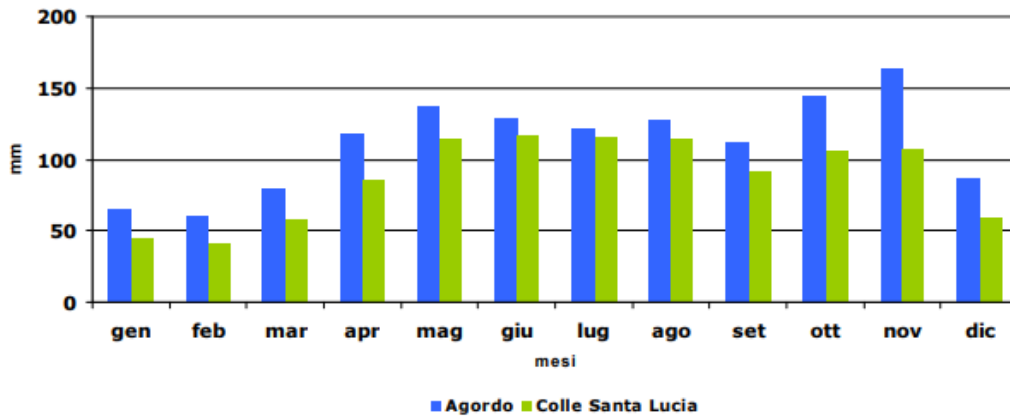


Figura 3.2 Precipitazioni medie mensili nel territorio agordino (Barbi et al., 2013)

Le categorie forestali maggiormente presenti nell'area sono le faggete e i piceo-faggeti rispettivamente nella parte centrale e meridionale, mentre nelle zone più a nord si riscontrano soprattutto le peccete, i lariceti e i larici-cembreti (fig. 3.3 e 3.4). Come si può osservare dalla fig. 3.3, il Faggio (*Fagus sylvatica*) si estende e si associa con l'abete rosso (*Picea abies*) dove il clima è ancora mesalpico, mentre nelle parte centrale e settentrionale, il clima endalpico, con precipitazioni di carattere più continentale, fa prevalere le peccete, i lariceti e consente l'insediamento del Pino cembro (*Pinus cembra*), al di sopra dei 1500 m s.l.m (Del Favero et al., 2000).

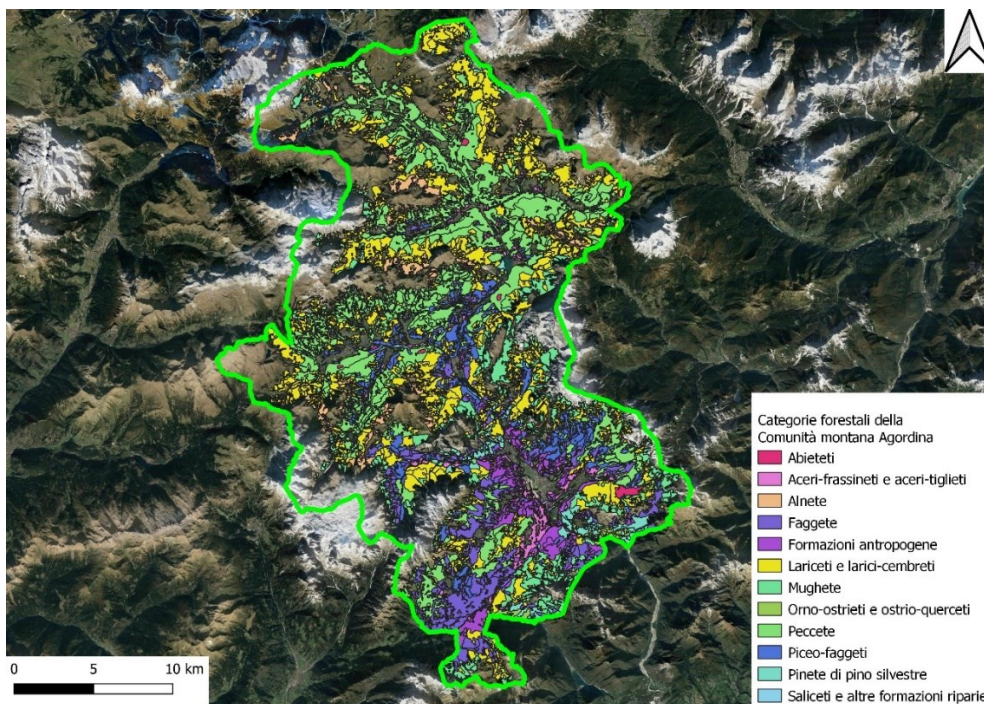


Figura 3.3 Carta delle categorie forestali della C.M.Agordina

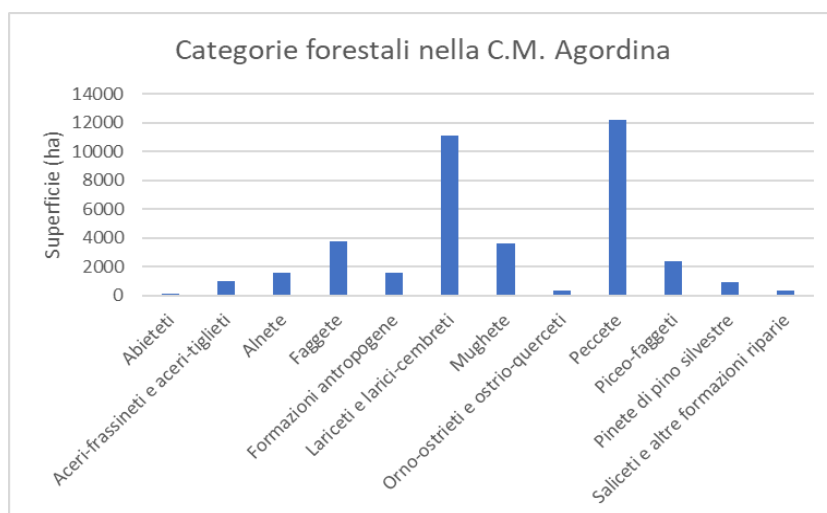


Figura 3.4 Istogramma delle categorie forestali del territorio agordino

La litologia dell'area è prevalentemente di natura calcarea e calcareo-dolomitica, ma sono anche presenti diversi rilievi costituiti da vulcaniti, come ad esempio nella zona tra il Passo Valles e il Col Margherita, tra la Val di Gares e la valle di San Lucano, e molti rilievi montuosi della parte settentrionale della valle del Cordevole. (fig. 3.5).

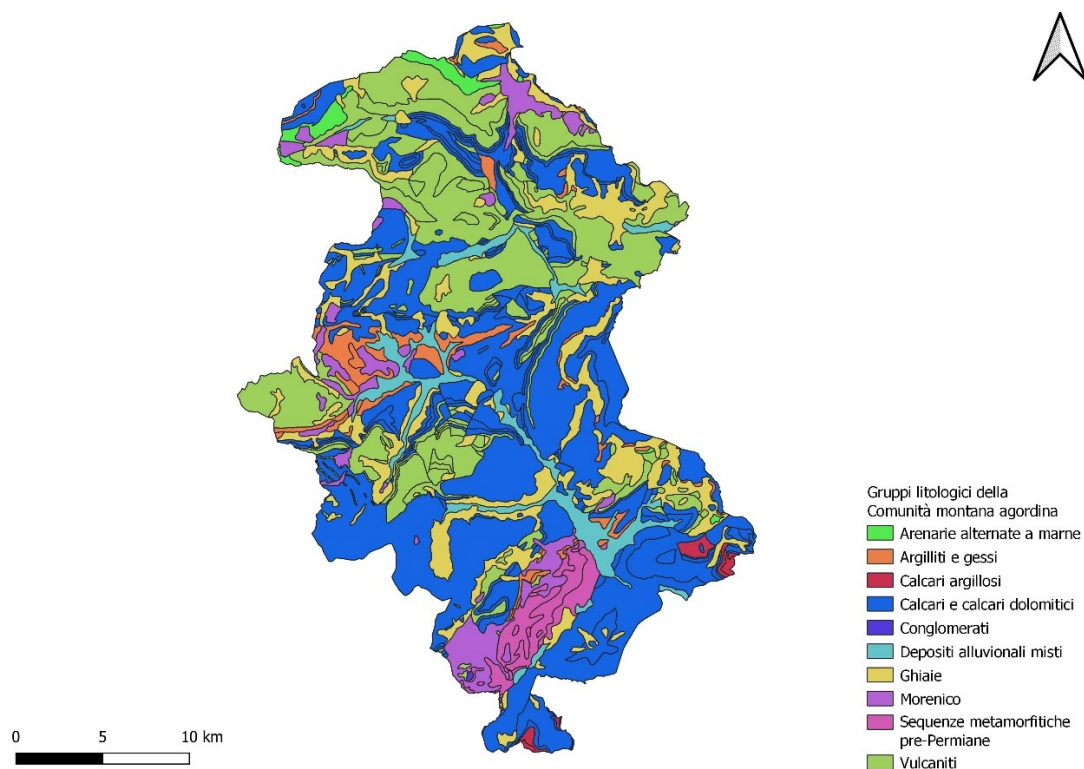


Figura 3.5 Carta dei gruppi litologici della C.M. Agordina

Dal punto di vista pedologico, i suoli che si sono formati e che sono presenti nel territorio agordino sono costituiti prevalentemente da materiale parentale delle rocce calcaree mesozoiche (calcari e dolomie) e in qualche area localizzata i rilievi hanno morfologie arrotondate con suoli costituiti da materiale parentale delle rocce ignee e metamorfiche.

Il territorio della Comunità Montana Agordina è stato gravemente colpito dalla tempesta Vaia del 2018, subendo, oltre a schianti in numerose aree boschive, anche danni alle infrastrutture come strade e abitazioni a causa di frane, alberi caduti ed esondazioni.

La superficie schiantata in quest'area è stata di oltre 4 mila ha, che equivale al 50.34% delle aree schiantate nell'intera provincia di Belluno. Il volume di legname schiantato è pari a 835'439 m³, che equivale al 48,43% delle masse a terra nella provincia di Belluno. In tabella 3.1 è possibile osservare i valori delle superfici schiantate per comune, all'interno della Comunità Montana Agordina (Vaia land).

Comuni UMA	Superficie schiantata per comuni (ha)
Agordo	75.6
Alleghe	229.3
Canale d'Agordo	139.1
Cencenighe Agordino	96.9
Colle S. Lucia	206.8
Falcade	41.8
Gosaldo	421.4
La Valle Agordina	153.6
Livinallongo del Col di Lana	871.7
Rivamonte Agordino	337.4
Rocca Pietore	740.6
San Tomaso Agordino	236.6
Selva di Cadore	42.9
Taibon Agordino	590.2
Vallada Agordina	31.8
Voltago Agordino	154.6

Tabella 3.1 Superfici schiantate nella Comunità Montana Agordina (Vaia land, 2023)

3.1.1 Franza

L'area di studio Franza è situata nel territorio dolomitico tra la valle del Cordevole e il passo Falzarego, nel comune di Livinallongo del Col di Lana. Questa zona ha un'elevata importanza per gli aspetti paesaggistici, turistico-ricreativi e storici, dato che fu teatro dei conflitti tra l'Impero austro-ungarico e il Regno d'Italia durante la Prima guerra mondiale. La superficie conta 10.92 ha, e sono stati analizzati i movimenti di 87 tronchi in 5 plots, ciascuno con superficie intorno ai 1000 m².

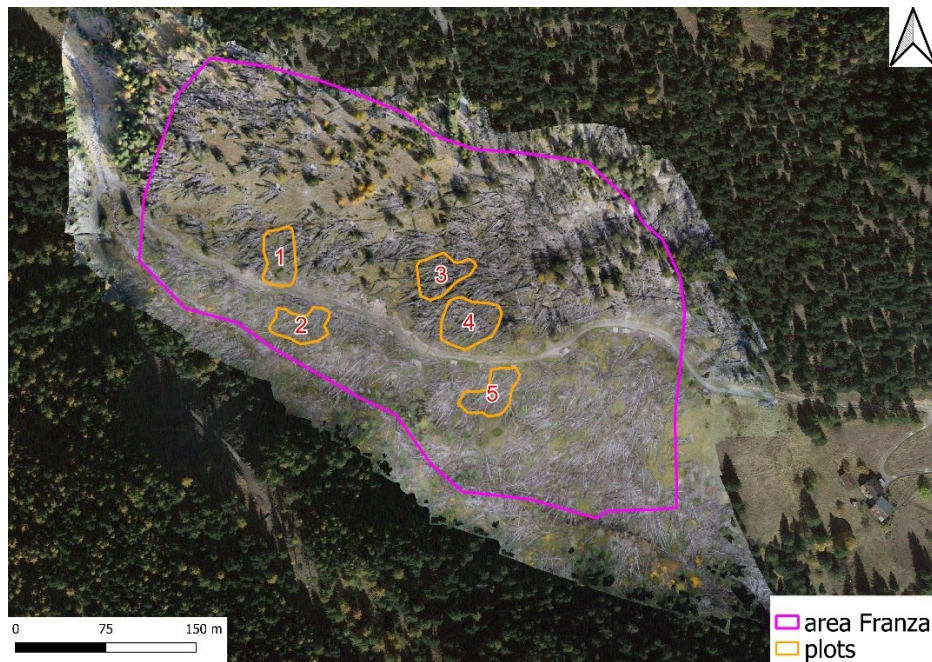


Figura 3.6 Area di studio Franza. Nello sfondo ortofoto del 2019.

L'esposizione prevalente dell'area è Sud - Sud est e l'altimetria va dai 1664 m s.l.m. ai 1937 m s.l.m. La pendenza minima è 0° (per la presenza della strada forestale), la massima è 80° e la media è di 37° (79%). L'area è stata gravemente colpita dalla tempesta Vaia del 2018 e non sono stati eseguiti interventi di recupero del legname, tranne quelli necessari per rendere accessibile la strada.

La copertura forestale pre-Vaia era costituita dalla categoria delle peccete, con tessitura del suolo franco-sabbiosa, dominata da abete rosso, con presenza anche di abete bianco (*Abies alba*) e larice (*Larix decidua*). Approssimativamente il 5-10 % della copertura forestale originale non è stato danneggiato.

Sono stati effettuati 5 rilievi con drone a cadenza annuale durante il periodo autunnale, a partire dal 2019 fino al 2023, per avere minore copertura arbustiva e servirsi della caduta del fogliame a terra.

In tab. 3.2 vengono riportate le caratteristiche dei plots in cui sono state eseguite le analisi.

Area di studio	Plot	Superficie (m ²)	Pendenza media (°)
Franza	1	1130	41
	2	1055	32
	3	1158	31
	4	1592	32
	5	1145	34

Tabella 3.2 Superficie e pendenza dei plot usati nell'area di studio Franza per le analisi

3.1.2 Col di lana

L'area di studio Col di lana è situata anch'essa tra la valle del Cordevole e il passo Falzarego, nel comune di Livinallongo del Col di Lana. La superficie conta 4.19 ha, sono stati analizzati i movimenti di 71 tronchi in 5 plots, con superficie tra 500 e 1000 m².

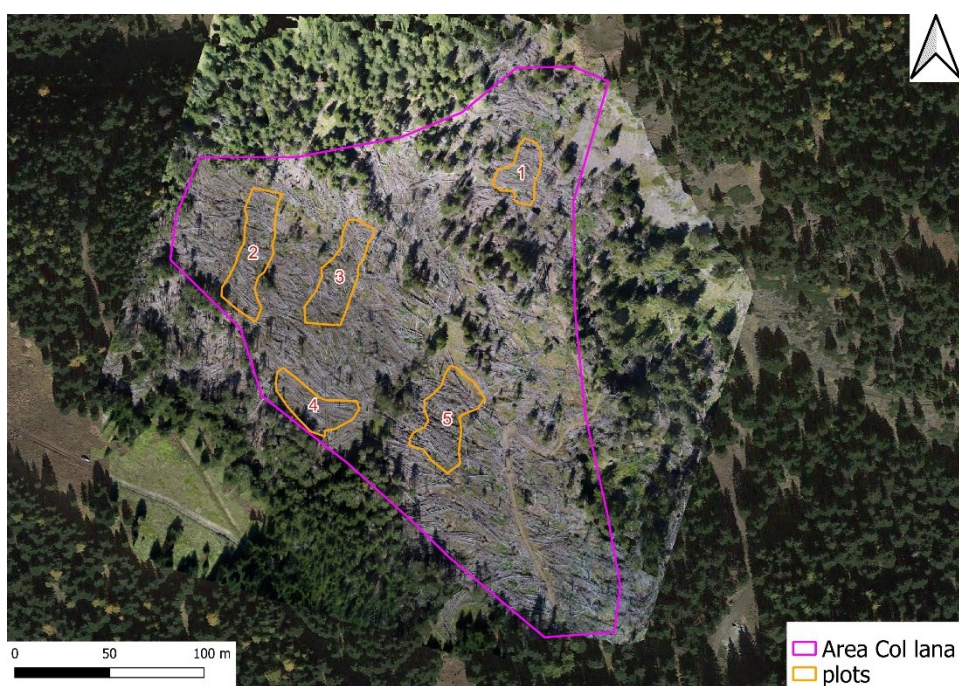


Figura 3.7 Area di studio Col di lana con base ortofoto 2020

L'esposizione prevalente dell'area è Sud-ovest e l'altimetria va da 1900 m s.l.m. a 2077 m s.l.m.. La pendenza minima è 0° (per la presenza della strada forestale), la massima è 83° e la media è di 34° (74%). L'area è stata gravemente colpita dalla tempesta Vaia del 2018 e la maggior parte del soprassuolo è stato schiantato, come si può notare dall'ortofoto del 2020 (fig. 3.7).

La copertura forestale pre-Vaia era costituita dalla categoria delle peccete, con tessitura del suolo franco-sabbiosa, dominata da abete rosso (*Picea abies*), con presenza di larice (*Larix decidua*),

quest'ultima è stata l'unica specie resistente al vento. Approssimativamente il 15-20 % della copertura forestale originale non è stato danneggiato.

In tabella 3.3 vengono riportate le caratteristiche dei plots in cui sono state eseguite le analisi.

Area di studio	Plot	Superficie (m ²)	Pendenza media (°)
Col di lana	1	508	33
	2	1080	33
	3	974	38
	4	712	32
	5	1073	37

Tabella 3.3 Superficie e pendenza dei plot usati nell'area di studio Col di lana per le analisi

Sono stati effettuati 2 rilievi, rispettivamente nel 2020 e nel 2022, durante il periodo autunnale per avere minore copertura arbustiva grazie alla caduta del fogliame a terra.

3.2 Rilievi in campo

Le condizioni delle aree di studio sono state catturate attraverso voli con drone. La tecnica utilizzata per ottenere i dati di partenza di ortofoto e DEM (Digital Elevation Model) è la fotogrammetria.

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che permette di ottenere informazioni metriche di un oggetto (forma, posizione), partendo da una coppia o più di immagini fotografiche prese da angolazioni differenti (Gomasca, 2004).

I droni che sono stati utilizzati per i rilievi erano dotati di GPS che permettono la collocazione nello spazio delle immagini ottenute. Inoltre, sono stati acquisiti diversi GCP (Ground Control Points) attraverso un'antenna GNSS per georeferire accuratamente gli output della elaborazione fotogrammetrica.



Figura 3.8 Ricevitore GNSS utilizzato per l'acquisizione dei GCP nell'area Franza (2019)

Per ottenere una misurazione metricamente più precisa è stato usato il sistema RTK (Real Time Kinematic) nell'area Franza, dato che era possibile usufruire della copertura internet.



Figura 3.9 Posizionamento del ricevitore base GNSS per la correzione della misurazione in tempo reale nell'area Franza (2019)

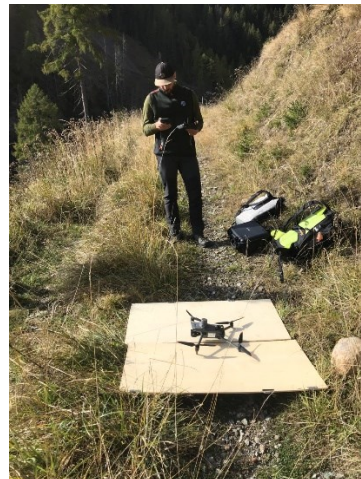


Figura 3.10 Preparazione del volo con drone nell'area Franza (2019)

I fotogrammi ripresi dal drone vengono poi sovrapposti per ricostruire la posizioni degli oggetti a terra. Per queste operazioni ci si è avvalsi del software di processamento immagini Agisoft Metashape (Agisoft LLC, St Peterburg, Russia), il quale permette di estrarre una nuvola di punti dalle fotografie georiferite, e da questa di generare il DSM e ortofoto ad elevata risoluzione.

L'accidentalità delle aree ha rappresentato la principale difficoltà nell'esecuzione dei rilievi, soprattutto per quanto riguarda i tempi e la difficoltà di spostamento per l'acquisizione dei GCP sparsi all'interno dell'area di studio.

3.3 Elaborazione dati telerilevati

Per entrambe le aree è stato utilizzato il DTM acquisito nel 2019 dalla Regione Veneto ed è stato poi utilizzato per le successive analisi, assumendo che non ci fossero stati variazioni del terreno come movimenti terra e frane, come infatti è stato verificato.

Per la perimetrazione dei tronchi ci si è avvalsi del software QGIS v.3.28.13 e nelle aree di studio sono stati selezionati e disegnati attraverso delle polilinee i tronchi che erano visibili in ciascun anno di rilievo (esempio in fig. 3.11). Questa operazione è risultata complicata dalla difficoltà nell'identificare alberi schiantati interi, dalla base al cimale, dato che molto spesso sono coperti da altri alberi a terra e da arbusti. Inoltre, nelle ortofoto più recenti, la difficoltà era maggiore a causa della crescita, sempre più avanzata, dello strato arbustivo che copriva parzialmente o interamente alberi che erano facilmente visibili nei primi anni.



Figura 3.11 Esempio di polilinea tracciata su alberi a terra. (Area Col di lana, anno 2020)

Le polilinee sono state disegnate utilizzando le ortofoto di ogni anno, per ciascun albero, che è stato possibile vedere in ciascun anno di rilievo. Ciò è stato possibile grazie all'elevata risoluzione delle ortofoto disponibili. Il tracciamento delle polilinee ha cercato di mantenere il più possibile la linea centrale dell'albero schiantato, considerando quelli che sono rimasti interi negli anni.

Completata questa fase, è stato osservato inizialmente il verificarsi di dinamiche sui movimenti dei tronchi. Osservando visivamente le linee nei diversi anni è già possibile notare una dinamica più o meno spinta.



Figura 3.12 Polilinee dei tronchi dell'anno 2020 e 2022 nell'area Col di lana su base ortofoto 2020.

La prima fase analitica ha cercato di individuare metricamente lo spostamento planimetrico dei tronchi, attraverso l'impiego del software R. Il calcolo è stato effettuato derivando la minima distanza planimetrica del punto mediano delle linee dell'anno di riferimento con la linea dell'anno successivo, in senso ortogonale. È possibile osservare uno schema riassuntivo del metodo in fig. 3.13.

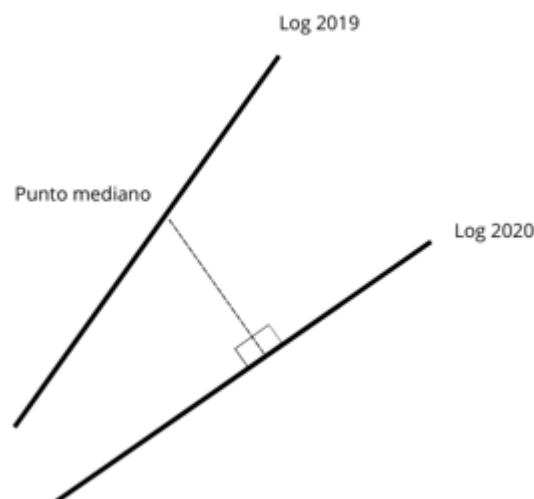


Figura 3.13 Schema del metodo utilizzato per determinare lo spostamento orizzontale dei tronchi nei diversi anni

La precisione utilizzata per il calcolo dei movimenti planimetrici è di 5 cm (equivalente al valore di georeferenziazione dell'ortofoto). Al di sotto di tale valore non viene considerato spostamento.

Questo metodo presenta il vantaggio di trovare lo spostamento planimetrico del tronco mediato tra il movimento di un'estremità e l'altra. Lo svantaggio di questa applicazione invece è che non permette di risalire al valore di rotazione planimetrico rispetto all'anno precedente, che comunque nella maggior parte dei casi risulta visivamente trascurabile.

La seconda fase ha previsto l'analisi dell'abbassamento della biomassa. Per questa operazione è stato necessario calcolare l'altezza dei tronchi in ciascun anno di rilievo. A partire dai DSM (Digital Surface Model) e dal DTM (Digital Terrain Model) è stato possibile calcolare l'altezza della vegetazione, in particolare dei tronchi, attraverso la differenza tra questi due modelli, ottenendo il CHM (Canopy Height Model).

In figura 3.14 è riportato graficamente cosa catturano questi modelli.

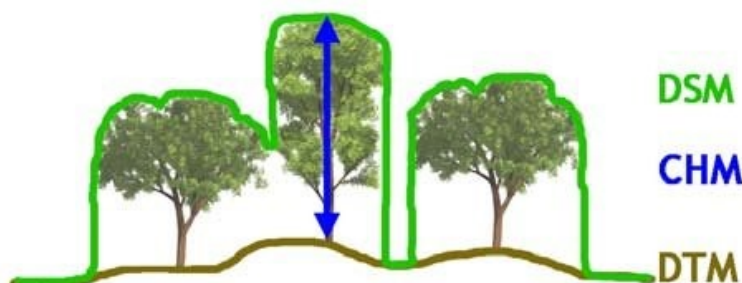


Figura 3.14 Schema del funzionamento dei principali modelli digitali (DEM) utilizzati nell'elaborazione dei dati

Il CHM è stato calcolato per ogni anno di rilievo. Per associare i valori di altezza del CHM ai tronchi, in ambiente GIS, ci si è avvalsi dello strumento SAGA “Add raster values to features”.

Questo strumento individua i pixel che sono interessati dalle features del layer che viene selezionato, in questo il layer delle linee dei tronchi. I valori di altezza della vegetazione dei pixel vengono mediati per attribuire un valore medio di quota alla feature/linea, in questo caso al tronco manualmente identificato.

Le informazioni tecniche relative ai rilievi fotogrammetrici, al DTM e DSM, per le aree di studio Franza e Col di lana, sono riportate in tabella 3.4.

Sito	Data	Ortofoto risoluzione (m)	GCP (n°)	GCP accuratezza (x,y,z residual error, [cm])	DSM (risoluzione [m])	DTM 2019 (risoluzione [m])
Franza	10/2019	0.02	12	3.7	0.05	0.5
	29/10/2020	0.01	15	4.4	0.05	0.5
	2021	0.015	13	3.7	0.05	0.5
	2022	0.02	9	4.8	0.1	0.5
	2023	0.01	8	6.4	0.05	0.5
Col di Lana	15/09/2020	0.02	10	2.5	0.05	0.5
	2022	0.025	10	6.6	0.05	0.5

Tabella 3.4 Informazioni tecniche relative ai rilievi fotogrammetrici, DTM e DSM utilizzati nelle due aree di studio

L'errore dei valori di movimenti orizzontali e verticali è stato calcolato tramite la propagazione dell'errore in X e Y (e Z per i movimenti verticali) del rilievo fotogrammetrico rispetto ai GCP. Per il calcolo dell'errore tra i rilievi di due anni consecutivi si è utilizzata la seguente formula

$\delta u_{DoD} = \sqrt{\delta u_{pre}^2 + \delta u_{post}^2}$, dove δu_{pre} e δu_{post} sono gli errori associati al DSM dell'anno precedente (es. 2019) e dell'anno successivo (es. 2020) (Brasington, J. et al., 2003).

3.4 Dati altezza neve

Nello studio dell'evoluzione della biomassa a terra schiantata in un'area montana, diventa importante considerare gli elementi abiotici che possono provocare questa evoluzione. Uno tra questi è il manto nevoso.

Esso a prima vista, può sembrare un corpo rigido, ma in realtà ha un comportamento molto simile ad un fluido viscoso, dal punto di vista delle proprietà meccaniche e delle sollecitazioni interne che subisce. Nel corso del tempo il manto nevoso ha dei movimenti lenti che si riassumono in assestamento, scorrimento e slittamento. Questi movimenti lenti possono esercitare forze

considerevoli su opere fissate su un pendio, sulla base degli alberi e, come in questo caso, anche sulla biomassa a terra schiantata, determinandone lo spostamento.



Figura 3.16 Movimenti lenti del manto nevoso (A. Paolini et al., 2001)

Quando siamo in situazione di pendio, l'aumento dell'inclinazione e l'aumento dell'altezza del manto nevoso possono aumentare queste sollecitazioni (A. Paolini et al., 2001).

Per questo motivo sono stati ricavati i dati di altezza neve dalla stazione nivometrica automatica di Arpav seguendo i criteri di vicinanza al sito di studio, simile esposizione e quota. La stazione nivometrica scelta è quella del Monte Cherz (BL), installata il 20/10/2017, che risiede alla quota di 2010 m s.l.m. con esposizione sud (fig. 3.17).

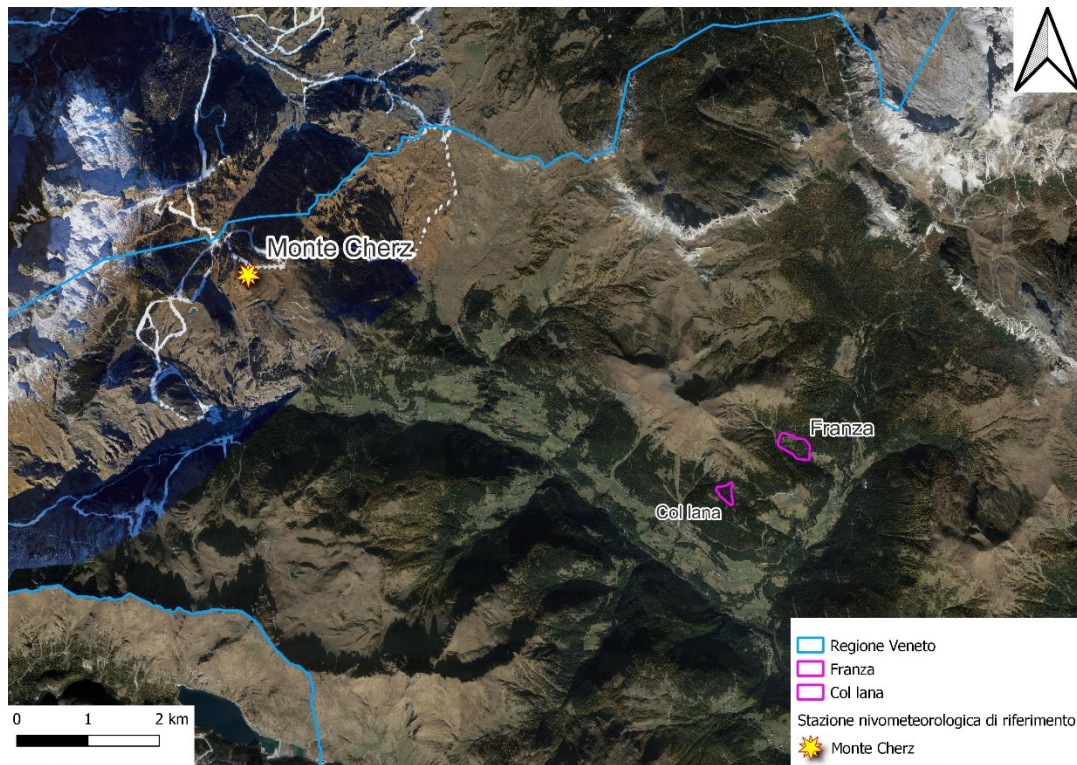


Figura 3.17 Inquadramento geografico della stazione nivometeorologica di Monte Chertz e delle aree di studio

Stazione	Quota	Data installazione	Esposizione	Coordinate UTM
Monte Chertz	2010 m	20.10.2017	Sud	32TQS20855555

Tabella 3.5 Dati della stazione nivometeorologica di Monte Chertz (BL)

La stazione è dotata di numerosi sensori, tra cui nivometro, termometro aria, anemoscopio, anemometro, albedometro, igrometro e termometro neve.

Il nivometro è montato su una staffa a 7 m dal suolo e il suo principio di funzionamento si basa su trasduttore piezoelettrico con misura rilevata emettendo brevi impulsi di frequenza ultrasonica verso la superficie del manto nevoso e rilevando gli echi di ritorno. Sistema di autocorrezione della misura mediante un sensore di temperatura integrato che tiene conto della variazione della velocità del suono in funzione della densità dell'aria. Il sensore presenta un'accuratezza di ± 1 cm, sensibilità di 0.5 cm e temperatura di funzionamento da -20 a $+65^{\circ}\text{C}$ (Valt e Crepaz, 2020).

Sono stati estratti i valori di altezza neve (HS) dal 2019 al 2023 consultando gli annali nivometeorologici della montagna veneta che l'Arpav produce per ogni anno, dal 1 gennaio al 31 dicembre. Questi report contengono importanti informazioni con i dati della rete di stazioni nivometeorologiche automatiche e per ciascun parametro, i dati sono presentati in tabelle annuali

dove sono riportati i singoli valori giornalieri nonché i valori mensili ed annuali come medie, minime, massime e deviazione standard.

Per i dati mancanti dell'anno 2023 sono stati richiesti direttamente alla struttura di riferimento.

I valori utili che sono stati estratti per lo scopo di questa tesi sono i valori massimi mensili di altezza neve dal 2019 al 2023 (fig. 3.18). Durante questi 5 anni non si sono verificate nevicate con elevati quantitativi. Il valore più alto di altezza neve massima mensile del quinquennio è di 175 cm a febbraio 2021 e si rileva che la stagione invernale 2020/2021 è stata la più nevosa.



Figura 3.18 Valori massimi mensili di altezza neve tra il 2019 e il 2023 nella stazione di Monte Cherz (BL)

4 RISULTATI

In questo capitolo vengono introdotti i risultati delle elaborazioni dei dati ottenuti attraverso l'impiego del software QGis. I dati che vengono presentati per le due aree di studio includono

- Movimenti orizzontali/planimetrici
- Movimenti verticali
- Confronto dei movimenti con i valori massimi mensili di altezza neve
- Altezza degli elementi dal suolo

Il periodo che è stato considerato e in cui sono stati eseguiti i rilievi fotogrammetrici va dal 2019 (anno seguente alla tempesta Vaia) al 2023. Il numero di tronchi analizzati è stato rispettivamente 71 per l'area Franza e 87 per l'area Col di lana.

4.1 Movimenti orizzontali

I risultati ottenuti nelle due aree di studio rilevano che ci sono stati movimenti orizzontali in ciascun anno di rilievo. In figura 4.1 vengono riportati graficamente i movimenti orizzontali che si sono verificati nei diversi anni nelle due aree di studio Col di lana e Franza.

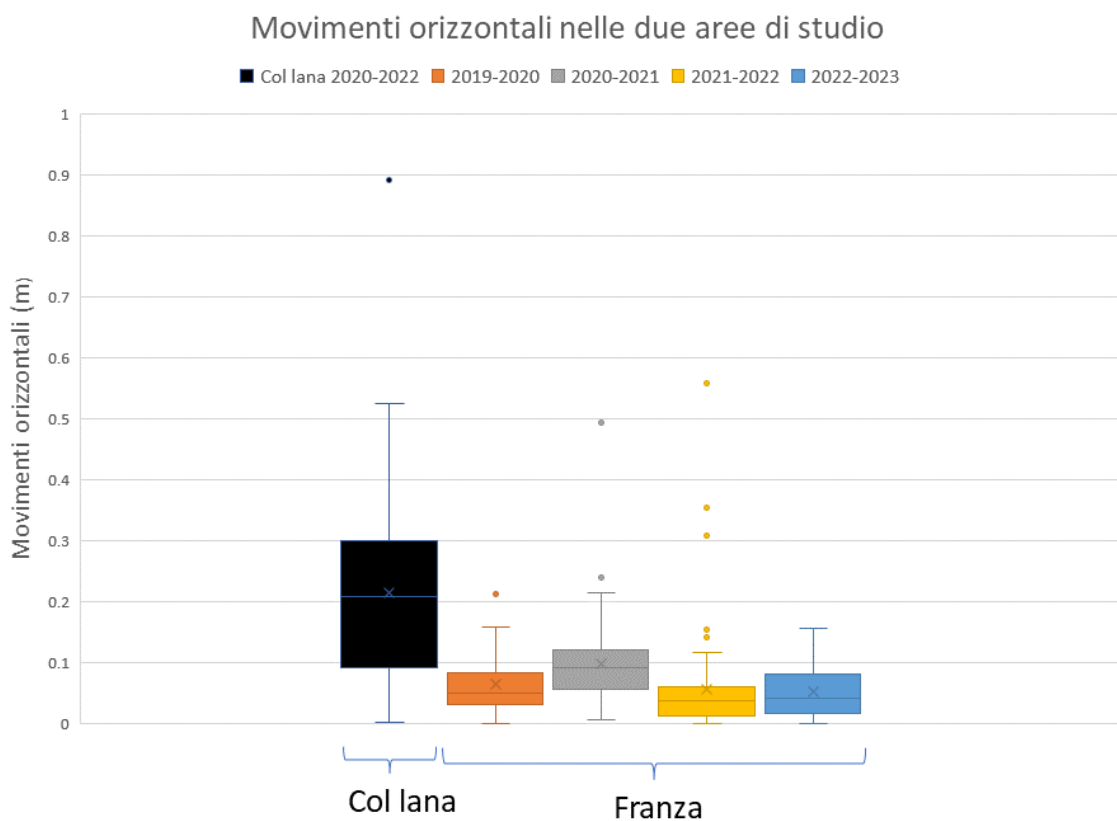


Figura 4.1 Movimenti orizzontali nelle aree di studio Franza e Col di lana dal 2019 al 2023

Movimenti orizzontali medi (cm)

Franza				Col di lana
2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023	2020-2022
6 cm	10 cm	6 cm	5 cm	21 cm
±4.42	±3.88	±4.20	±5.75	±3.56

Tabella 4.1 Movimenti orizzontali medi (cm) nelle due aree di studio

I risultati rappresentati in figura 4.1 e tabella 4.1 si riferiscono ai movimenti complessivi di tutti i tronchi (logs) di ogni area di studio, ovvero 71 logs nell'area di Col di lana e 87 logs nell'area Franza. Il metodo utilizzato per determinare l'errore (tab. 4.1) è illustrato nel capitolo 3.3.

Nell'area Col di lana i movimenti risultano maggiori rispetto a quelli di Franza perché sono riferiti al confronto tra due anni, il 2020 e 2022. Nell'area Franza invece i risultati sono riferiti al confronto tra ciascun anno di rilievo consecutivo, dal 2019 al 2023.

In media i movimenti orizzontali dei tronchi monitorati in Col di lana, nel biennio tra il 2020 e il 2022 sono stati di 21 cm, mediamente 10.5 cm all'anno, mentre in Franza i tronchi si sono spostati mediamente di 7 cm ogni anno.

Nel complesso, considerando tutti gli anni di rilievo, nell'area Franza i tronchi si sono spostati dal 2019 al 2023 in totale di 27 cm, e l'anno in cui si sono spostati maggiormente è tra il 2020 e 2021, mentre nell'area Col di lana dal 2020 al 2022 si sono spostati in totale di 21 cm.

4.2 Movimenti verticali

I risultati ottenuti nelle due aree di studio rilevano che ci sono stati movimenti verticali in ciascun anno di rilievo. In figura 4.2 vengono riportati graficamente l'altezza rispetto al suolo dei log identificati rispettivamente nei diversi anni nelle due aree di studio Col di lana e Franza, mentre in tabella 4.2 vengono riportati i valori medi di altezza dal suolo.

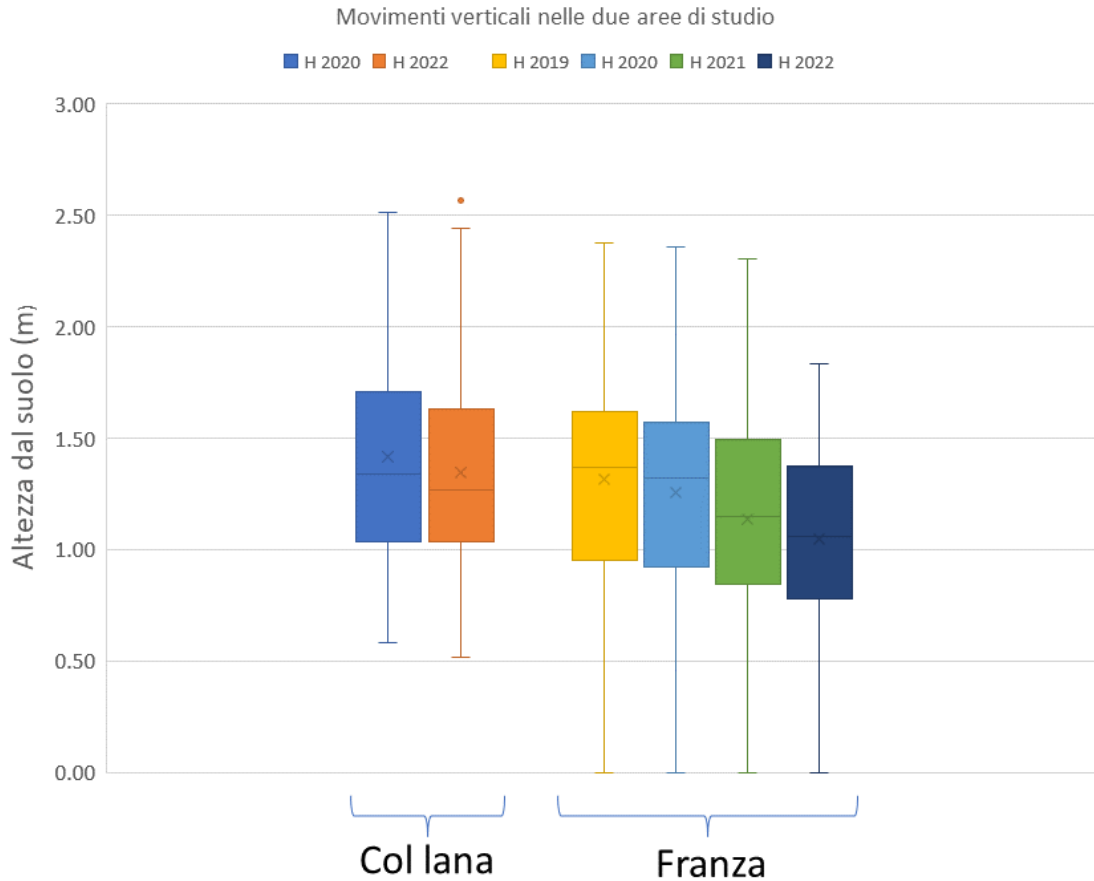


Figura 4.2 Grafico dei movimenti verticali che si sono verificati nelle aree studio Franza (2019-2022) e Col di lana (2020-2022)

	H (m) 2019	H (m) 2020	H (m) 2021	H (m) 2022	ΔH (m)
Franza	1.37 ± 0.036	1.32 ± 0.044	1.20 ± 0.043	1.09 ± 0.063	0.28 (2019-2022)
Col di lana		1.42 ± 0.025		1.34 ± 0.041	0.08 (2020-2022)

Tabella 4.2 Altezza dal suolo media (H) dei tronchi monitorati dal 2019 al 2022 in Col di lana e Franza

I movimenti verticali si riferiscono all'altezza verticale, e non all'altezza effettiva (perpendicolare al terreno). Il metodo utilizzato per determinare l'errore (tab. 4.2) è illustrato nel capitolo 3.3.

I risultati rappresentati di figura 4.2 e tabella 4.2 si riferiscono ai movimenti verticali complessivi di tutti i tronchi (logs) di ogni area di studio, ovvero 71 logs nell'area di Col di lana e 87 logs nell'area Franza.

Cumulativamente, nell'area Franza i tronchi si sono abbassati mediamente di 28 cm, mentre nell'area Col di lana si sono abbassati di 8 cm.

I risultati rappresentati in figura 4.2 e in tabella 4.2 non tengono conto dei dati di altezza dal suolo dei logs dell'anno 2023 perché questi risultavano più elevati rispetto all'anno precedente. Facendo

alcune verifiche dei DSM, è stato notato che spesso questi sono stati influenzati dalla maggiore copertura arbustiva presente nel 2023, causando quindi valori maggiori di altezza dal suolo rispetto alla realtà (esempio in fig. 4.3).

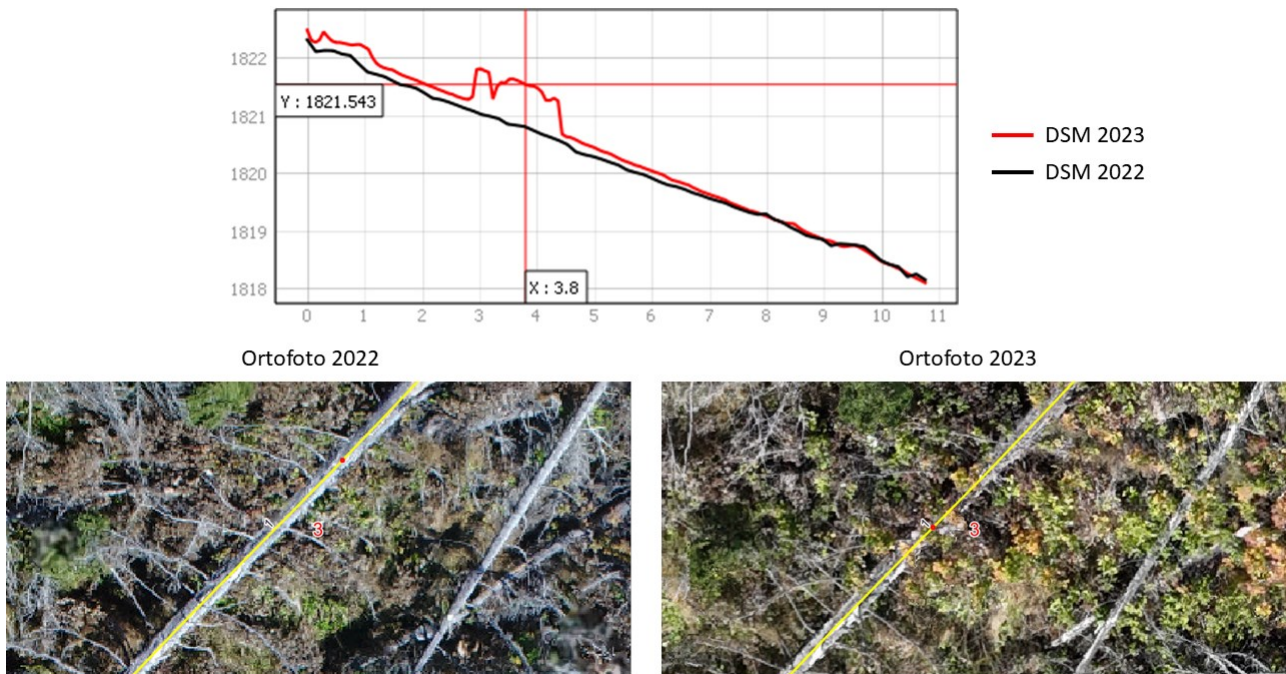


Figura 4.3 Differenza tra il profilo del tronco nel DSM del 2022 e 2023 nell'area studio Franza causata dalla presenza degli arbusti

Il raggruppamento dei dati di altezza dal suolo dei logs in Franza e Col di lana ha permesso di ottenere la restituzione grafica di figura 4.4 e 4.5, dove è possibile osservare la tendenza all'abbassamento, più o meno marcata, nei vari anni considerati.

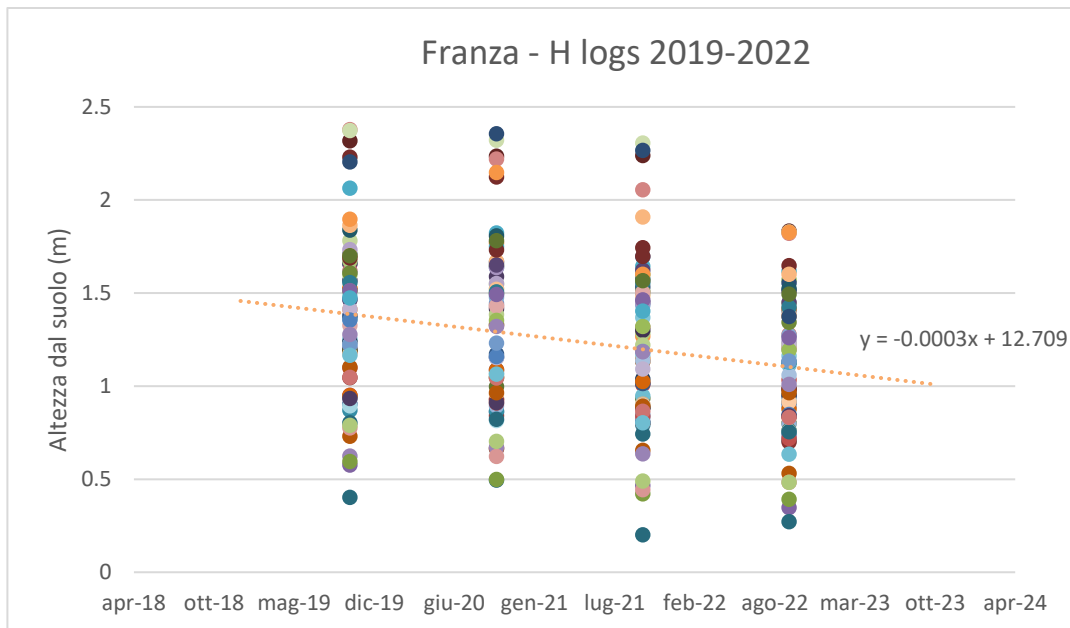


Figura 4.4 Grafico delle altezze dal suolo (m) di tutti i logs dell'area Franza (2019-2022)

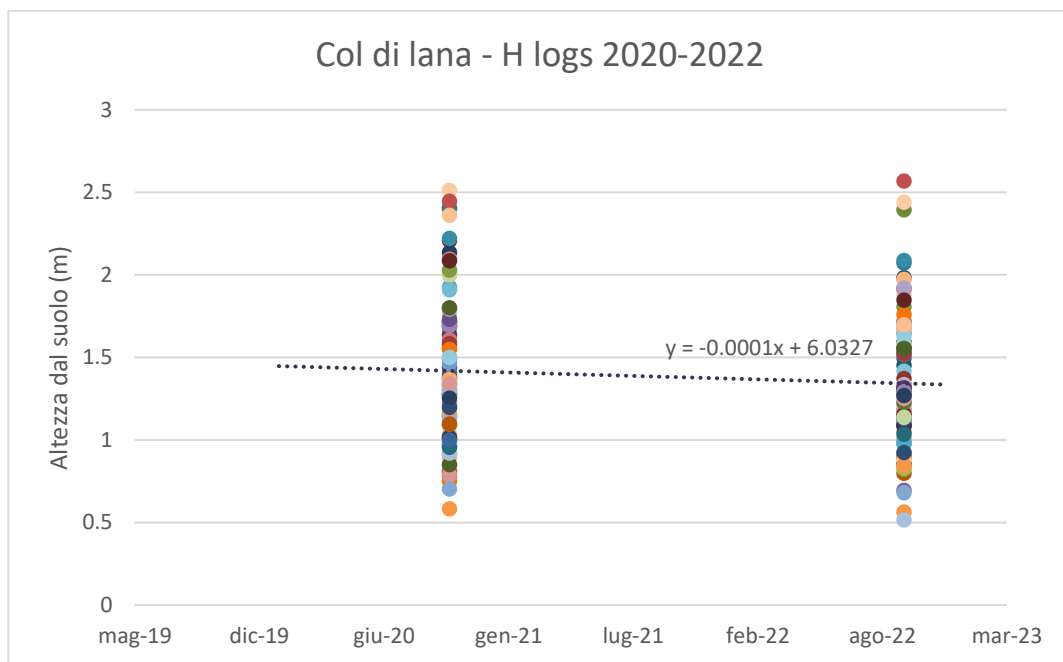


Figura 4.5 Grafico delle altezze dal suolo (m) di tutti i logs dell'area Col di lana (2020-2022)

Le equazioni di regressione lineare sono state ottenute considerando tutte le serie di dati di altezza dei logs negli anni considerati, attraverso la funzione presente nell'estensione di Office "Kutools". Nel grafico di figura 4.4 è stato possibile ottenere, tramite regressione lineare, l'equazione che rappresenta la tendenza dei tronchi ad abbassarsi nei diversi anni. Attraverso l'equazione risulta esserci un abbassamento medio di 9.49 cm/anno.

Anche nel grafico di figura 4.5 è stato possibile ottenere, tramite regressione lineare, l'equazione che rappresenta la tendenza dei tronchi ad abbassarsi, ma avendo a disposizione solamente due serie di dati (rilievi 2020 e 2022) questa espressione potrebbe non essere veritiera.

4.3 Confronto movimenti con altezza neve

Per le due aree di studio è stato realizzato un confronto tra i movimenti orizzontali e verticali della biomassa a terra con i valori massimi di altezza neve mensili nel periodo tra il 2019 e il 2023.

Come illustrato nel capitolo 3.4, nel periodo considerato la stagione invernale che è stata interessata da maggiori accumuli di neve è stata quella del 2020-2021, con il valore massimo di altezza neve di 175 cm a febbraio 2021.

In figura 4.6 viene rappresentato graficamente il confronto dei movimenti orizzontali medi (valori di tab. 4.1) con i valori massimi di altezza neve mensili per l'area Franza.

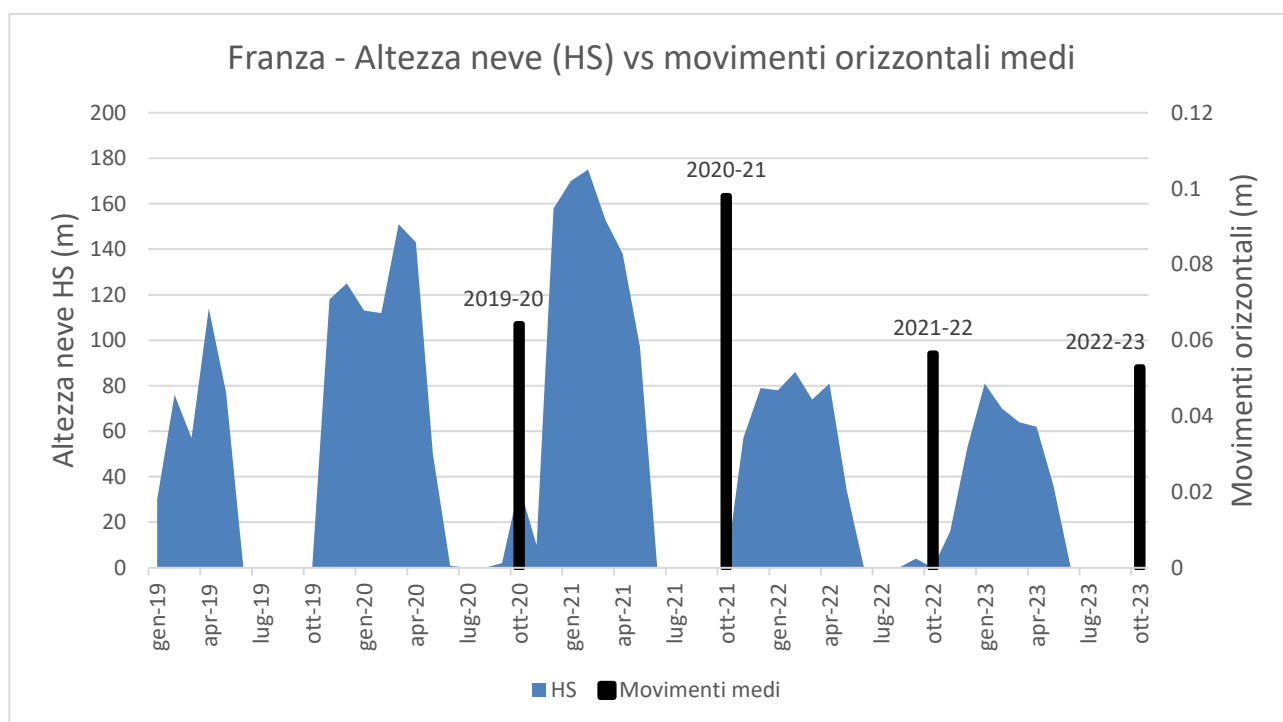


Figura 4.6 Grafico del confronto tra i valori massimi mensili di altezza neve e i movimenti orizzontali medi dei logs dell'area Franza (2019-2023)

I rilievi fotogrammetrici con drone effettuati ad ottobre 2020 nelle due aree di studio sono stati effettuati quando non si erano ancora verificate nevicate.

Per l'area Col di lana non viene riportato il confronto perché si dispone solamente dei dati di spostamento di un biennio e non permettono un confronto adeguato con i valori di altezza neve nei diversi anni di rilievo, come per l'area di Franza. La correlazione tra movimenti orizzontali medi e i valori massimi mensili di altezza neve risulta buona ed evidente per l'area Franza

Per quanto riguarda il confronto tra altezza dal suolo dei logs (H) e altezza neve (HS), in figura 4.7 è rappresentato graficamente il confronto per l'area Franza, mentre in figura 4.9 il confronto per l'area Col di lana. In fig. 4.8 invece è possibile osservare il confronto tra abbassamento medio (ΔH) e altezza neve (HS) in Franza. Per Col di lana questo confronto non è possibile dato che si dispone solamente di una serie di dati di abbassamento.

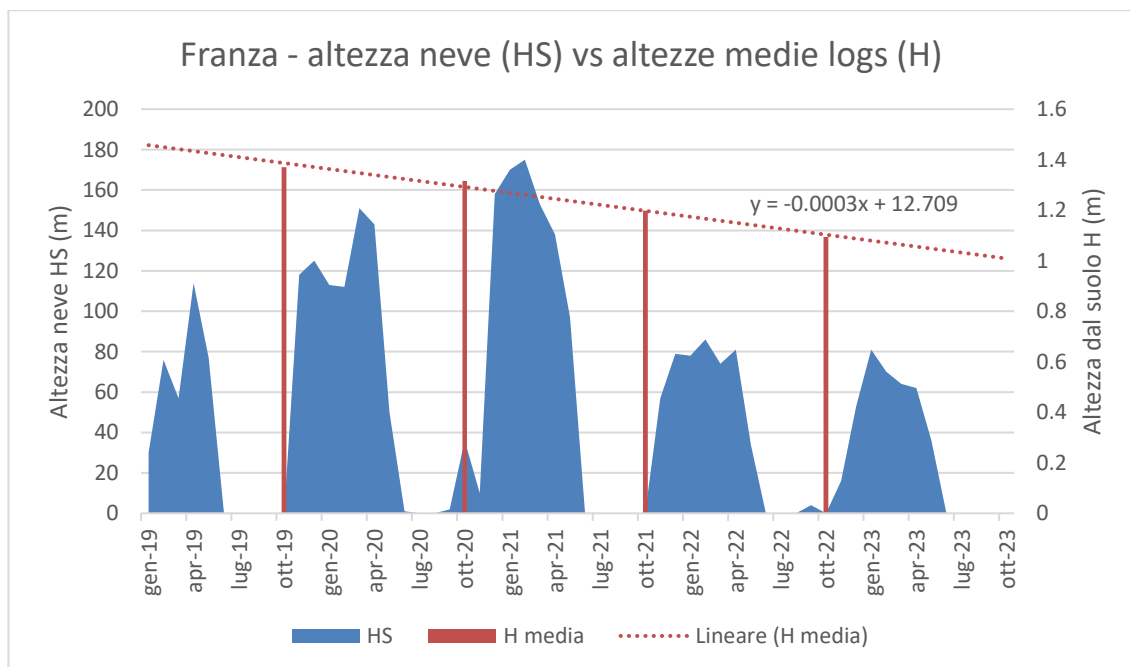


Figura 4.7 Grafico del confronto tra altezza dal suolo dei logs (H) e valori massimi mensili di altezza neve (HS) nell'area studio Franza (2019-2022)

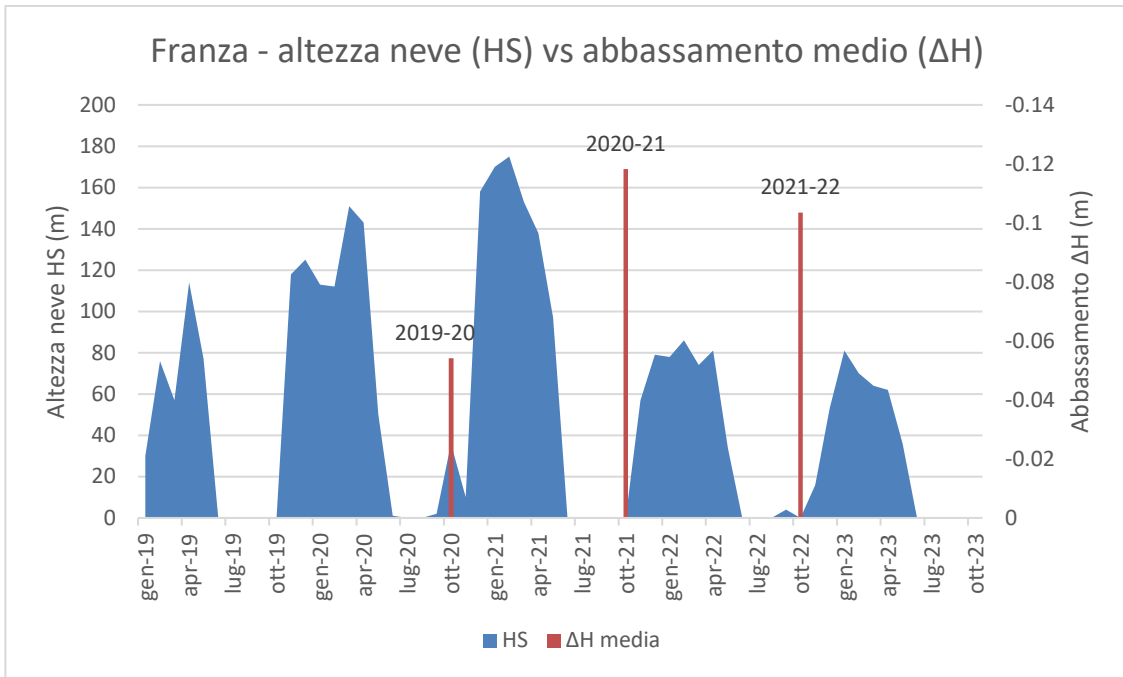


Figura 4.8 Grafico del confronto tra abbassamento medio dei logs e valori massimi mensili di altezza neve (HS) nell'area studio Franza (2019-2022)

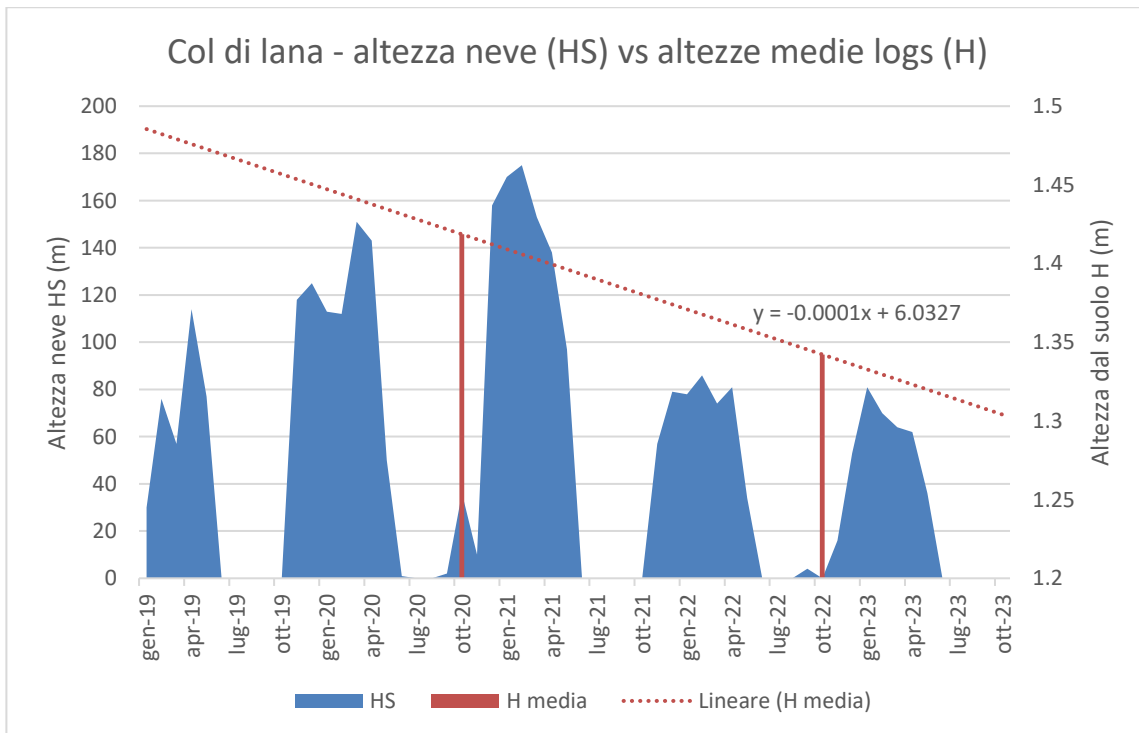


Figura 4.9 Grafico del confronto tra altezza dal suolo dei logs (H) e valori massimi mensili di altezza neve (HS) nell'area studio Col di lana (2019-2022)

4.4 Altezza elementi dal suolo

Attraverso l'utilizzo di QGis sono state analizzate le altezze al suolo dei tronchi monitorati nelle due aree di studio per i seguenti livelli: >0.5 m, >1 m e >1.5 m.

La densità dei logs si è ridotta man mano che ci si allontanava dal suolo.

Nel 2019 nell'area Franza, dei 71 logs totali, 70 avevano una distanza verticale rispetto al suolo di almeno 0.5 m, tra questi, 55 erano superiori a 1 m e 28 (39%) avevano superato 1.5 m. Nel 2022 la densità degli elementi sopra 1.5 m dal suolo si era ridotta a 11 (15%).

In figura 4.10 viene rappresentato graficamente il numero di logs nell'area Franza a differenti altezze.

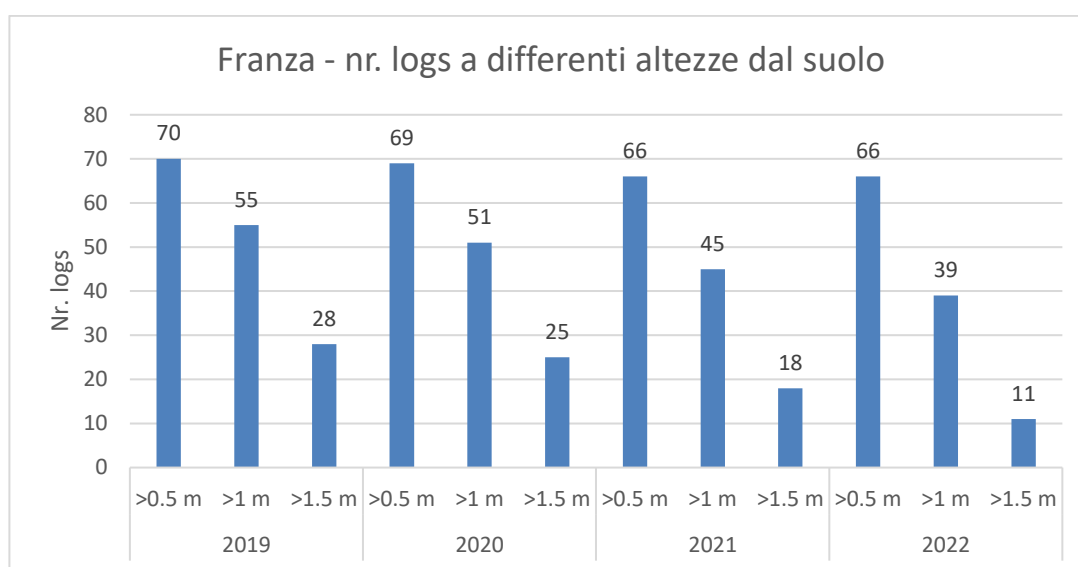


Figura 4.10 Numero di tronchi suddiviso per differenti livelli di altezza dal suolo nell'area Franza (2019-2022)

Nel 2020 nell'area Col di lana tutti gli 87 logs totali dell'area avevano un livello verticale superiore a 0.5 m, tra questi, 70 erano sopra quello di 1 m e 34 (39%) erano sopra 1.5 m. Nel 2022 la densità degli elementi sopra 1.5 m dal suolo si era ridotta a 31 (36%). In figura 4.11 è possibile osservare graficamente il numero di logs ai differenti livelli di altezza.

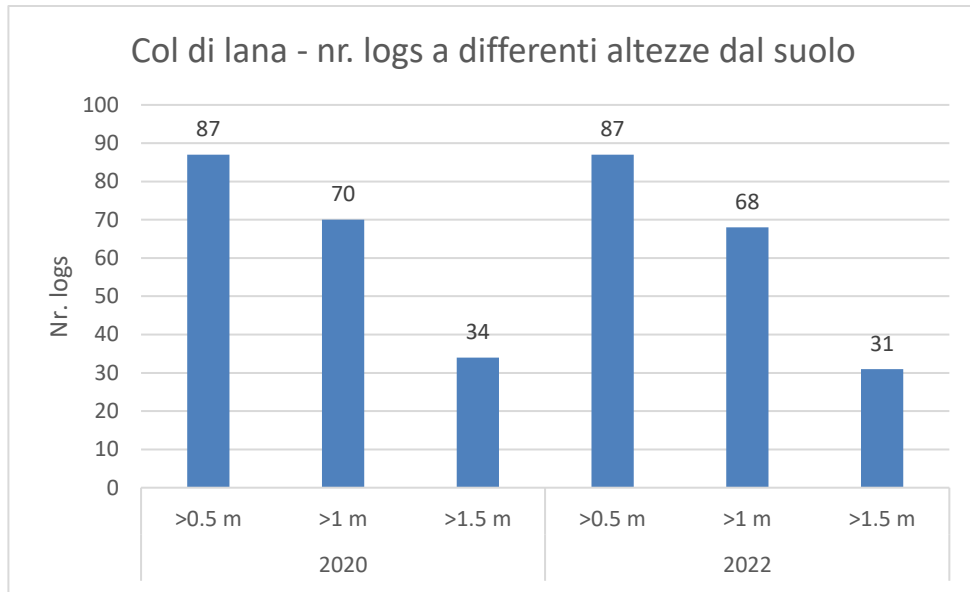


Figura 4.11 Numero di tronchi suddiviso per differenti livelli di altezza dal suolo nell'area Col di lana (2020-2022)

5 DISCUSSIONE

Riassumendo i risultati, negli anni di rilievo dal 2019 al 2023 sono stati effettuati voli fotogrammetrici per ottenere ortofoto e modelli digitali del terreno (DTM) e della superficie (DSM) ad alta risoluzione per calcolare l'altezza dei logs attraverso il CHM (Canopy height model).

Nel complesso i risultati indicano che dal 2019 al 2023, nell'area Franza i logs si sono spostati sul piano orizzontale mediamente di 27 cm, mentre in Col di lana, dal 2020 al 2022, i logs si sono spostati in media di 21 cm. Dal grafico di fig. 4.6 è possibile notare che in Franza i movimenti orizzontali sono stati mediamente più elevati tra il 2020 e il 2021, ovvero durante la stagione invernale che è stata caratterizzata da valori massimi di altezza neve maggiori rispetto al periodo considerato. Questo confronto non è stato possibile per l'area Col di lana dato che si dispone solamente di una serie di dati di spostamento.

Per quanto riguarda i movimenti verticali, i risultati rappresentati nel paragrafo 4 non tengono conto dei dati di altezza dal suolo dei logs dell'anno 2023 perché questi risultavano più elevati rispetto all'anno precedente. Attraverso la revisione dei valori più elevati del 2023 è stato notato che ciò potrebbe essere dovuto alla maggiore altezza degli arbusti in quest'anno che di conseguenza ha coperto maggiormente i tronchi rispetto all'anno precedente. Inoltre, l'autunno 2023 (settembre-novembre), per quanto riguarda le temperature massime e medie giornaliere, è stato il più caldo dal 1994, mentre per le temperature minime è stato il quarto più caldo (Arpav, Agrometeo Mese, n° 15 autunno settembre-novembre 2023). Questo andamento climatico ha comportato infatti la permanenza dell'apparato fogliare più a lungo rispetto agli anni precedenti, con la conseguente maggiore copertura dei logs dagli arbusti, comportando dei valori di altezza maggiori nel DSM rispetto a quelli reali (fig. 4.3).

Considerando quindi il periodo 2019-2022, in Franza è possibile notare il progressivo abbassamento medio in ogni anno, per un abbassamento complessivo di 28 cm. Anche nell'area Col di lana si è verificato l'abbassamento tra il 2020 e il 2022, con un abbassamento medio complessivo di 8 cm.

Nell'area Franza, l'anno dopo la tempesta Vaia, i tronchi risultavano avere un'altezza media di 1.37 m (tab. 4.2), più bassa rispetto all'altezza media dei tronchi schiantati di abete rosso (*Picea abies*) nell'area Disentis (Svizzera) di 2.1 m, nell'anno dopo la tempesta Vivian (Wohlgemuth et al., 2017). Complessivamente, in Franza l'abbassamento è più evidente e accentuato grazie al maggior numero di serie di dati a disposizione rispetto a Col di lana (fig. 4.2).

In Franza tra il 2020 e il 2022 l'abbassamento medio è stato di 23 cm. La differenza tra queste due aree potrebbe essere dovuta alla maggiore densità di biomassa a terra schiantata nell'area Col di lana, che potrebbe comportare un più lento abbassamento.

Nel confronto tra i valori massimi mensili di altezza neve e i movimenti verticali, è possibile notare in fig. 4.8 che l'abbassamento dei logs tra il 2020 e il 2021 è stato maggiore rispetto all'anno precedente, in corrispondenza con la stagione invernale interessata da maggiori quantitativi di neve. Questa osservazione concorda anche con quelle effettuate da Frey e Thee (2002) nel decennio successivo alla tempesta Vivian, dove gli inverni con nevicate consistenti hanno determinato un carico di neve maggiore, favorendo l'abbassamento (fig. 5.1).

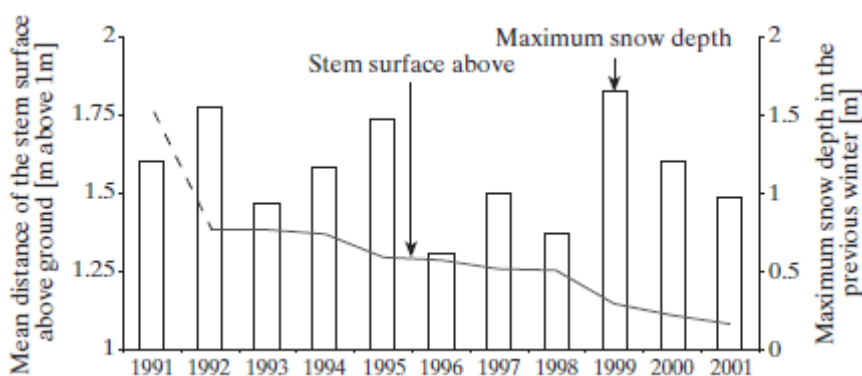


Figura 5.1 Sviluppo dell'altezza media dal suolo dei tronchi e valori massimi di altezza neve nel decennio dopo la tempesta Vivian (Frey e Thee, 2002)

Nell'anno seguente 2021-22 l'abbassamento è stato analogo all'anno precedente, nonostante non si sia verificato un inverno particolarmente nevoso.

Inoltre, in sede di analisi dei dati, si è cercata una correlazione tra movimenti medi e pendenza del terreno media dei plot ma i risultati non hanno dimostrato legami rilevanti tra queste due variabili, probabilmente a causa del basso range di pendenze del terreno dei vari plot delle due aree, che va dai 31° a 41°. Infatti, secondo Bebi et al. (2015), la velocità di spostamento dipende principalmente dalla pendenza del pendio, con maggiori spostamenti nelle zone ripide con pendenze superiori a 45°. Inoltre, dove i tronchi giacevano incrociati o dove era presente rinnovazione, il movimento dei tronchi veniva rallentato.

Ai fini di valutare quanto i logs sono complessivamente alti rispetto al suolo, e quindi per avere un'idea indicativa dell'altezza di ingombro, sono stati quantificati in diversi livelli di altezza nelle due aree di studio: >0.5 m, >1 m e >1.5 m (figure pag 4.10 e 4.11).

In entrambe le aree, la maggior parte dei logs ha un'altezza inferiore a 1.5 m. In Franza, nel 2022, solo il 15% dei logs superava 1.5 m, mentre in Col di lana il 36% dei logs superava 1.5 m. Questi risultati sono abbastanza congruenti con i valori di altezza di ingombro (riferiti alla necromassa al suolo) individuati nelle aree permanenti di Ospitale e Valbona (Dolomiti d'ampezzo) dove non sono stati effettuati interventi dopo la tempesta Vaia del 2018 (Marson, 2020).

Facendo un confronto anche con i dati di altezza dei tronchi dal suolo misurati in Svizzera dopo la tempesta Vivian del 1990, i risultati si rivelano concordanti anche con quelli esposti da Frey e Thee (2002).

Facendo un confronto anche con i dati di "breve periodo" tra il 1990/91 e il 1993 misurati su ceppaie e tronchi a terra, in Svizzera dopo la tempesta Vivian del 1990, i risultati si rivelano in linea con quelli esposti da Frey et al. (1995). Questi autori avevano rilevato nell'area Schwanden (Svizzera), tre anni dopo la tempesta, movimenti orizzontali medi di 5-10 cm e movimenti verticali medi (abbassamento) di 10 cm.

Nell'area Schwanden, rispetto a Franza, la biomassa si è abbassata mediamente meno (10 cm) rispetto a Franza (28 cm) nei tre anni successivi alla tempesta. Anche per i movimenti orizzontali, in Schwanden la biomassa si è spostata mediamente meno (5-10 cm) rispetto a Franza (22 cm).

Questa differenza potrebbe essere influenzata dalla densità di tronchi schiantati, da quanto sono incastrati tra loro e dalle precipitazioni nevose.

Per quanto riguarda i metodi di rilievo, complessivamente, la fotogrammetria si è rivelata una tecnica ottimale per i risultati ricercati. Bisognerà però nei prossimi anni valutare se l'utilizzo delle immagini aeree da drone sarà possibile, tenendo conto delle limitazioni dovute alla crescita degli arbusti e della rinnovazione forestale. Inoltre, sarebbe opportuno, soprattutto negli anni successivi, effettuare delle verifiche in campo per supportare, confermare o eventualmente correggere, i risultati ottenuti. Un aspetto sfavorevole dell'utilizzo del DSM per il monitoraggio dei movimenti, è che risulta complesso monitorare un numero maggiore di tronchi mediante polilinee in ambiente GIS, o di altri elementi (es. ceppaie), rispetto a quelli individuati in questa tesi. Questo soprattutto nelle aree dove c'è maggiore densità di tronchi a terra, perché con il passare degli anni i tronchi vengono sempre più coperti e diventa complesso individuarli nelle ortofoto. Un metodo integrativo o alternativo che necessiterebbe di alcune prove potrebbe essere quello di monitorare i movimenti della biomassa a terra attraverso dei punti individuati con l'utilizzo dei GIS, integrando quindi l'uso delle polilinee, su ogni tronco o elemento, anche con più punti sullo stesso tronco, specialmente su quelli più difficilmente osservabili nel tempo, in maniera simile ad alcuni test eseguiti da Frey e Thee (2002).

6 CONCLUSIONI

In questa tesi è stata analizzata l'evoluzione della biomassa a terra schiantata in seguito alla tempesta Vaia del 2018 in due aree studio situate nel territorio dolomitico della Comunità Montana Agordina, in cui non sono stati eseguiti interventi di recupero del legname, piantumazioni o installazione di opere di protezione dai pericoli naturali.

L'obiettivo del lavoro era quello di individuare e analizzare i movimenti che subiscono i tronchi a terra, utilizzando la fotogrammetria per produrre i modelli digitali (DEM) e le ortofoto necessari a queste analisi. Attraverso il calcolo del CHM è stato possibile determinare l'altezza dei tronchi e determinarne, mediante l'utilizzo di QGis, i movimenti orizzontali. Il periodo considerato va dal 2019 al 2023. Un altro obiettivo era di andare ad osservare la relazione tra i movimenti dei tronchi e le precipitazioni nevose, in particolare si voleva verificare se elevati valori di altezza neve possono causare maggiori movimenti. Infine, sono stati effettuati confronti con altri studi per verificare se i risultati erano congruenti, soprattutto con alcune ricerche svolte in Svizzera a seguito della tempesta Vivian.

Dai risultati, è emerso che i tronchi hanno subito spostamenti sia in senso orizzontale che in senso verticale, in entrambe le aree di studio, in simile misura. Nell'area Franza lo spostamento complessivo medio è risultato di 27 cm e l'abbassamento totale medio di 28 cm, mentre in Col di lana i logs si sono spostati mediamente di 21 cm e abbassati mediamente di 8 cm.

Per quanto riguarda il confronto dei movimenti con le altezze del manto nevoso, è emerso che i movimenti orizzontali e verticali sono risultati maggiori nell'anno in corrispondenza con la stagione invernale 2020-21, dove si sono registrati valori massimi di altezza neve maggiori rispetto agli altri anni del periodo considerato. In quell'anno, nell'area Franza l'abbassamento medio è risultato di 12 cm e lo spostamento medio di 10 cm.

Inoltre, si è osservato che la stagione invernale 2020-21 ha influenzato e causato maggiori movimenti orizzontali e verticali in egual misura, senza influenzare maggiormente l'abbassamento, come si era ipotizzato.

L'analisi dei tronchi per differenti livelli di altezza dal suolo (0.5, 1 e 1.5 m) ha permesso di rilevare che la maggior parte di essi, al quarto anno successivo alla tempesta Vaia, aveva un'altezza inferiore o uguale a 1.5 m. Questa indicazione, con ulteriori indagini, permette di supportare la definizione dell'altezza efficace necessaria per evitare l'innesco di valanghe.

I risultati sono stati più significativi per l'area Franza, rispetto a Col di lana, perché si disponeva di dati a cadenza annuale.

La fotogrammetria si è dimostrata un metodo efficace nel rilevamento dei movimenti dei tronchi ma è necessario valutare l'utilizzo delle immagini aeree da drone considerando le possibili problematiche, come la copertura progressiva dei tronchi nel tempo che complica l'individuazione nelle ortofoto.

Grazie a queste analisi è stato possibile aumentare il dataset sui movimenti dei tronchi, che al momento risulta carente tra gli studi presenti in letteratura. In futuro è auspicabile continuare a monitorare l'evoluzione della biomassa a terra, specialmente l'abbassamento, per aiutare a definire e determinare nel tempo il grado di protezione che possono avere le aree a "No intervention", come è stato fatto in Svizzera in seguito alla tempesta Vivian da Wohlgemuth et al. (2017). Sarà quindi importante integrare queste ricerche con altri studi, ad esempio con lo studio dell'evoluzione della rinnovazione (altezza delle piantine, composizione specifica), sul grado di decomposizione del legname, per capire l'entità e la durata del gap temporale di protezione insufficiente.

In questa maniera, sarà possibile avere un'idea più chiara dell'effetto di protezione, soprattutto riguardo agli eventi valanghivi e di caduta massi, che può avere un'area in pendenza, colpita da disturbi da vento, con materiale legnoso a terra.

7 BIBLIOGRAFIA

- Anders Taerøe, Johannes H.C. de Koning, Magnus Löf, Anne Tolvanen, LÁrus Heiðarsson, Karsten Raulund-Rasmussen (2019). Recovery of temperate and boreal forests after windthrow and the impacts of salvage logging. A quantitative review <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.048>
- Andrea D. Kupferschmid, Harald Bugmann (2005). Effect of microsites, logs and ungulate browsing on *Picea abies* regeneration in a mountain forest, *Forest Ecology and Management*, Volume 205, Issues 1–3, 2005, Pages 251–265. 0.1016/j.foreco.2004.10.008
- Arpav – Centro Meteorologico di Teolo. Maltempo in Veneto: pioggia e vento eccezionali. <https://www.arpa.veneto.it>
- Arpav (2023) Agrometeo Mese n° 15 autunno (settembre-novembre 2023). <https://www.arpa.veneto.it>
- Baggio Tommaso, Brožová Natalie, Bast Alexander, Bebi Peter, D'Agostino Vincenzo (2022) Novel indices for snow avalanche protection assessment and monitoring of wind-disturbed forests, *Ecological Engineering*, Volume 181, 106677, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106677>
- Barbi A., Cagnati A., Cola G., Checchetto F., Chiaudani A., Crepaz A., Delillo I., Mariani L., Marigo G., Meneghin P., Parsi S.G., Rech F., Renon B., Robert-Luciani T., (2013). Atlante climatico del Vneeto. Precipitazioni – Basi informative per l'analisi delle correlazioni tra cambiamenti climatici e dinamiche forestali nel Veneto. Regione del Veneto, Mestre.
- Bebi P, Putallaz J-M, Fankhauser M, Schmid U, Schwitter R, Gerber E (2015) Die Schutzfunktion in Windwurfllaˆchen. *Schweiz Z Forstwes* 166:168–176
- Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (Eds.). 2009. *La forêt face aux tempêtes*. Editions Quæ. ISBN: 978-2-7592-0330-7. Versailles Cedex, France.
- Blennow, K., Fleischer, P., Ingemarson, F., Gardiner, B., Carnus, J.-M., Ingemarson, F., Landmann, G., Lindner, M., Marzano, M., Nicoll, B., Orazio C., Peyron, J.-L., Reviron, M.-P., Schelhaas, M.-J., Schuck, A., Spielmann, M., & Usbeck, T. (2010). Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts Final report to European Commission-DG Environment *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1420.4006>
- Brasington, J., Langham, J., Rumsby, B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53, 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)
- Carrière JM, Lainard C, Le Bot C, Robart F (2000). A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteorol Appl* 7:229–238
- Chirici G, Giannetti F, Travaglini D, Nocentini S, Francini S, D'Amico G, Calvo E, Fasolini D, Broll M, Maistrelli F, Tonner J, Pietrogiovanna M, Oberlechner K, Andriolo A, Comino R, Faidiga A,

Pasutto I, Carraro G, Zen S, Contarin F, Alfonsi L, Wolynski A, Zanin M, Gagliano C, Tonolli S, Zoanetti R, Tonetti R, Cavalli R, Lingua E, Pirotti F, Grigolato S, Bellingeri D, Zini E, Gianelle D, Dalponte M, Pompei E, Stefani A, Motta R, Morresi D, Garbarino M, Alberti G, Valdevit F, Tomelleri E, Torresani M, Tonon G, Marchi M, Corona P, Marchetti M (2019). Stima dei danni della tempesta “Vaia” alle foreste in Italia. *Forest@* 16: 3-9. - <https://doi.org/10.3832/efor3070-016>

Del Favero R. (2000). Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto. Direzione Regionale per le Foreste e l’Economia Montana, Mestre, Italy, pp. 335.

DOTTA A., MOTTA R., Boschi di conifere montani. Indirizzi selvicolturali. Regione Piemonte, Blu Edizioni, Torino 2000, pp. 191

Fischer, A., Fischer, H.S. (2012) Individual-based analysis of tree establishment and forest stand development within 25 years after wind throw. *Eur J Forest Res* 131, 493–501. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0524-2>

FREHNER M., WASSER B., SCHWITTER R. (2005) Continuità nel bosco di protezione e controllo dell’efficacia. Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva. Collana Ambiente – Esecuzione. Ufficio federale dell’ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFAFP), Berna.

Frey W, Forster B, Gerber W, Graf F, Heiniger U, Kuhn N, Thee P (1995) Risiken und Naturgefahren auf Windwurfflächen. *Schweiz Z Forstwes* 146:863–872

Frey W, Thee P (2002) Avalanche protection of windthrow areas: a ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *For Snow Landsc Res* 77:89–107

Gardiner B., Andreas Schuck, Mart-Jan Schelhaas, Christophe Orazio, Kristina Blennow and Bruce Nicoll (eds). 2013. Living with storm damage to forests. What Science Can Tell Us 3. European Forest Institute.

Gardiner, B., Blennow, K., Carnus, J. M., Fleischner, P., Ingemarson, F., Landmann, G., Lindner, M., Marzano, M., Nicoll, B., Orazio, C., Peyron, J. L., Reviron, M. P., Schelhaas, M., Schuck, A., Spielmann, M., & Usbeck, T. (2010). Destructive storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission - DG Environment, European Forest Institute. <https://edepot.wur.nl/162053>

Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R. (2017)- Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12942>

Jubertie, F. (2008). L’impact de la tempête “Martin” sur le couvert forestier en Auvergne. Origine des chablis et logique de reconstitution. *Physio-Géo*, 2, 1-20. <http://physio-geo.revues.org/1014>

Kuuluvainen, T. (1994). Gap disturbance, ground microtopography, and the regeneration dynamics of boreal coniferous forests in Finland: a review. *Annales Zoologici Fennici*, 31(1), 35–51. <http://www.jstor.org/stable/23735497>

Larcher, W. (2001) *Physiological Plant Ecology*. 4th Edition, Verlag, Berlin Heidelberg, 91-101.

- Lemon P.C (1961), Forest ecology of ice storms, Bull. Torrey Bot. Club, 88, pp. 21-29
- Levin Simon A. (1992) The Problem of Pattern and Scale in Ecology: The Robert H. MacArthur Award Lecture. Ecology. Volume 73, Issue 6 December 1992 Pages 1943-1967
- Łukasz Pawlik (2013) The role of trees in the geomorphic system of forested hillslopes - A review, Earth-Science Reviews, Volume 126, Pages 250-265, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.007>
- Lutz, Harold J., (1940) "Disturbance of Forest Soil Resulting from the Uprooting of Trees". *Yale School of Forestry & Environmental Studies Bulletin Series*. 60.
- Mario A. Gomasasca (2004) ELEMENTI DI GEOMATICA con elementi di Geodesia e Cartografia, Fotogrammetria, Telerilevamento, Informatica, Sistemi di Ripresa, Sistemi di Posizionamento Satellitare, Elaborazione Digitale delle Immagini, Sistemi Informativi Territoriali, Sistemi di Supporto alle Decisioni, SIT in rete, INSPIRE e GMES, Dizionario Tecnico, Acronimi di ASITA
- Marson S. (2020). Analisi delle dinamiche forestali pre e post Vaia in aree di monitoraggio permanente: un caso studio nelle Dolomiti d'Ampezzo. Relatore Prof. Emanuele Lingua. Dipartimento territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di agraria, Università degli studi di Padova.
- Miller-Weeks, Margaret M. The Northeastern Ice Storm (1998): A Forest Damage Assessment for New York, Vermont, New Hampshire, and Maine. NEFA, cooperating with the USDA Forest Service, 1999.
- Močalov SA, Lässig R (2002) Development of two boreal forests after large-scale windthrow in Central Urals. *For Snow Landsc Res* 77:171–186
- Motta R, Ascoli D, Corona P, Marchetti M, Vacchiano G (2018). Selvicoltura e schianti da vento. Il caso della “tempesta Vaia”. *Forest@* 15: 94-98. - <https://doi.org/10.3832/efor2990-015>
- Motta R., 1998 – Foreste di protezione in ambiente alpino: sostenibilità del non intervento e cure minime. Atti del II Congresso Nazionale di Selvicoltura, giornata preparatoria, Vercelli
- Nagel Thomas A., Firm Dejan, Rozenbergar Dusan & Kobal Milan (2016) Patterns and drivers of ice storm damage in temperate forests of Central Europe. *Eur J Forest Res* 135, 519–530. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0950-2>
- Paolini Alfredo, Tognoni Gianluca, Turrone Elena, Valt Mauro (2001). Le valanghe. AINEVA
- Paula Sanginés de Cárcer, Piotr S. Mederski, Natascia Magagnotti, Raffaele Spinelli, Benjamin Engler, Rupert Seidl, Andreas Eriksson, Jeannette Eggers, Leo Gallus Bont & Janine Schweier (2021) The Management Response to Wind Disturbances in European Forests. *Curr Forestry Rep* 7, 167–180. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00144-9>
- Peltola, Heli & Kellomäki, Seppo. (1993). A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand age. *Silva Fennica*. 1993. 27(2): 99-111.. 27. 10.14214/sf.a15665.

- Peterson, G., Allen, C. & Holling, C. (1998) Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems* 1, 6–18. <https://doi.org/10.1007/s100219900002>
- Putz, F.E.. (1983). Treefall Pits and Mounds, Buried Seeds, and the Importance of Soil Disturbance to Pioneer Trees on Barro Colorado Island, Panama. *Ecology*. 64. 1069. <https://doi.org/10.2307/1937815>
- R.J. Stathers, T. P. Rollerson, and S.J. Mitchell (1994), *Windthrow Handbook for British Columbia Forests*
- Regione Autonoma Valle d'Aosta - Regione Piemonte, 2006 - *Selvicoltura nelle foreste di protezione Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d'Aosta*. Compagnia delle Foreste, Arezzo, pp. 224
- Regione del Veneto (2023). Rapporto bostrico agosto. <https://idt2.regione.veneto.it/portfolio/vaia-e-bostrico/>
- Regione Veneto (2018). Relazione evento 27/10/2018 – 01/11/2018. <https://www.regione.veneto.it>
- Regione Veneto, AVEPA - Agenzia Veneta per i Pagamenti (attività commissariale OCDPC 558/2018), CNR-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Dipartimento TeSAF, Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, ESRI. *Vaia Land - Valuation and Application of Innovative Approaches in LANDslide risk mitigation*. <https://storymaps.arcgis.com/stories/805a52d1c18a4b4a8e44a30c153d5f39>
- Roberto Del Favero, Emanuele Lingua, Mario Pividori (2019) *Selvicoltura per la protezione dai disturbi*. Compagnia delle Foreste
- Romagnoli F., Cadei Alberto, Costa Maximiliano, Marangon Davide, Pellegrini Giacomo, Nardi Davide, Masiero Mauro, Secco Laura, Grigolato Stefano, Lingua Emanuele, Picco Lorenzo, Pirotti Francesco, Battisti Andrea, Locatelli Tommaso, Blennow Kristina, Gardiner Barry, Cavalli Raffaele (2023). Windstorm impacts on European forest-related systems: An interdisciplinary perspective, *Forest Ecology and Management*, Volume 541, 121048, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121048>
- S.T.A. Pickett e P.S. White (1985) *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press. New York
- Schelhaas, Mart-Jan, Gert-Jan Nabuurs, Andreas Schuck (2003) *Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries*. *Global Change Biology*. Volume9, Issue11. Pages 1620-1633
- Schelhaas, Mart-Jan. (2008). *Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios*. *Dissertationes Forestales*. 2008. <https://doi.org/10.14214/df.56>
- Schönenberger W (2002a) Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: the first ten years after the 1990 storm Vivian. *For Snow Landsc Res* 77:61–80

- Schönenberger, Walter & Noack, Andreas & Thee, Patrick. (2005). Effect of timber removal from windthrow slopes on the risk of snow avalanches and rockfall. *Forest Ecology and Management*. 213. 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.062>
- Schönenberger, Walter. (2002). Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: The first ten years after the 1990 storm Vivian. *Forest Snow and Landscape Research*. 77.
- Sinjur I, Vertacnik G, Likar L, Hladnik V, Miklavcic I, Gustincic M (2014) Ice storm in Slovenia in January and February—spatial and temporal variability in weather across the Dinaric landscapes in Slovenia. *Gozdarski Vestnik* 72:299–309
- Stathers, R.J., T.P. Rollerson, and S.J. Mitchell (1994). *Windthrow handbook for British Columbia forests*. B.C. Min. For., Victoria, B.C. Working Paper 9401.
- Taylor Anthony R., MacLean David A., McPhee Donnie, Dracup Evan, Keys Kevin (2017) Salvaging has minimal impacts on vegetation regeneration 10years after severe windthrow, *Forest Ecology and Management*, Volume 406, Pages 19-27, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.061>
- Thomas Wohlgemuth, Raphael Schwitter, Peter Bebi, Flurin Sutter & Peter Brang (2017) Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. *Eur J Forest Res* 136, 1029–1040. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x>
- UFAM 2008: Supporto decisionale in caso di danni alle foreste provocati da tempesta. Aiuto all'esecuzione relativo alla scelta della gestione dei danni nei singoli casi. Manuale relativo ai danni da tempesta 2008, parte 3. Pratica ambientale n. 0801. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 138 p.
- Valt M. e Crepaz G. (2020) *Annale nivometeorologico della montagna veneta 2019*. <https://www.arpa.veneto.it>
- Vertacnik G, Dolinar M, Sinjur I, Gustincic M (2015) Meteorological conditions during the ice storm causing glaze ice at the end of January and the beginning of February 2014. *Ujma* 29:149–173