



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA

TITOLO

Dinamica del materiale legnoso nel torrente Tegnias durante la Tempesta Vaia: approccio integrato  
tra rilievi di campo, GIS e modellazione numerica

Candidato: Emanuele Sacco

Relatore: Prof. Stefano Sibilla

Correlatore: Dr. Diego Ravazzolo

A.A. 2025/2026

# Sommario

ABSTRACT.....	4
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....	5
1.1 Definizione e origine del materiale legnoso.....	5
1.2 Dinamiche di trasporto e contesti morfologici.....	7
1.3 Formazione degli accumuli e ruolo morfologico.....	8
1.4 Gestione del legname e criticità.....	9
1.5 La Tempesta Vaia come caso emblematico.....	11
CAPITOLO 2 - OBIETTIVI.....	13
CAPITOLO 3 – MATERIALI E METODI.....	15
3.1 Inquadramento dell’area di studio.....	15
3.2 Il torrente Tegnás.....	17
3.3 Dati disponibili.....	19
3.4 Metodologia di analisi.....	21
3.4.1 Analisi del database del materiale legnoso.....	21
3.4.2 Analisi delle ortofoto in QGIS e definizione delle aree di reclutamento.....	22
3.5 Il modello ORSA2D_WT.....	24
3.5.1 Impostazione della simulazione numerica.....	25
CAPITOLO 4 – RISULTATI.....	29
4.1 Stato di conservazione degli elementi.....	29
4.2 Caratterizzazione delle specie arboree.....	30
4.3 Presenza di rami e foglie.....	31
4.4 Posizione degli elementi all’interno dell’alveo.....	31
4.5 Orientamento degli elementi rispetto alla direzione del flusso.....	32
4.6 Dimensioni degli elementi singoli.....	33
4.7 Analisi degli accumuli.....	34
4.8 Aree di potenziale reclutamento.....	36
4.9 Risultati della simulazione numerica con ORSA2D_WT.....	38
CAPITOLO 5 – DISCUSSIONI.....	45
5.1 Interpretazione complessiva delle caratteristiche del legname.....	45
5.2 Ruolo della posizione e della morfologia nella distribuzione degli elementi.....	46
5.3 Implicazioni geomorfologiche delle dimensioni degli elementi.....	47
5.4 Funzione e formazione degli accumuli legnosi.....	48
5.5 Discussione dei risultati della simulazione numerica.....	49
5.6 Limiti del lavoro e sviluppi futuri.....	50
CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI.....	52
BIBLIOGRAFIA.....	54

# Indice delle figure

- Figura 1.1** Dinamica del materiale legnoso in alveo (Martin & Benda 2001)
- Figura 1.2** Materiale legnoso in un sistema fluviale (Piégay, 2003)
- Figura 1.3** Accumuli di legname in un torrente alpino (Pecorari et al., 2007)
- Figura 1.4** Il legname in un fiume con letto in ghiaia (Pecorari et al., 2007)
- Figura 1.5** Ruolo del legname in un sistema fluviale (modificato da Gurnell et al., 2012)
- Figura 3.1** Inquadramento del bacino del Cordevole
- Figura 3.2** Rete idrografica e DTM del bacino del Cordevole
- Figura 3.3** Percorso del torrente Tegnas nella Valle di San Lucano (Ortofoto 2025)
- Figura 3.4** Dolomia
- Figura 3.5** Idrogramma della tempesta Vaia
- Figura 3.6** Ortofoto 2015 (a) ortofoto 2019 (b)
- Figura 3.7** Confronto tra ortofoto del 2015 (sinistra) e ortofoto del 2019 (destra)
- Figura 3.8** Idrogramma della portata simulata
- Figura 3.9** Posizione iniziale degli elementi legnosi e delimitazione della mesh di calcolo
- Figura 4.1** Stato di conservazione degli elementi singoli
- Figura 4.2** Specie degli elementi singoli
- Figura 4.3** Presenza/assenza di rami/foglie negli
- Figura 4.4** Posizione degli elementi singoli
- Figura 4.5** Orientamento degli elementi singoli rispetto alla direzione del flusso
- Figura 4.6** Dimensione elementi legnosi singoli
- Figura 4.7** Numero di elementi singoli legnosi che costituiscono gli accumuli
- Figura 4.8** Percentuale di vuoti negli accumuli
- Figura 4.9** Aree di reclutamento degli elementi legnosi lungo il tratto fluviale analizzato
- Figura 4.10** Tratto di sponda eroso
- Figura 4.11** Traiettoria elemento 1
- Figura 4.12** Traiettoria elemento 2
- Figura 4.13** Traiettoria elemento 3
- Figura 4.14** Traiettoria elemento 4
- Figura 4.15** Traiettoria elemento 5
- Figura 4.16** Traiettoria elemento 6
- Figura 4.17** Traiettoria elemento 7
- Figura 4.18** Traiettoria elemento 8

**Figura 4.19** Traiettoria elemento 9

**Figura 4.20** Traiettoria elemento 10

**Figura 4.21** Tipologie di moto che può compiere l'elemento legnoso (Ennouini et al., 2025)

## Indice delle tabelle

**Tabella 3.1** Struttura del database degli elementi legnosi rilevati nel torrente Tegnas

**Tabella 3.2** Parametri geometrici e posizione dei dieci elementi simulati

**Tabella 4.1** Superficie delle aree di reclutamento

**Tabella 4.2** Risultati della simulazione numerica

## ABSTRACT

La Tempesta Vaia (ottobre 2018) ha generato un apporto eccezionale di materiale legnoso nei bacini montani dolomitici, alterando in modo significativo la dinamica idromorfologica dei corsi d'acqua e generando nuove criticità legate al trasporto e all'accumulo di legname. In questo contesto, il presente lavoro analizza la dinamica del materiale legnoso nel torrente Tegnass attraverso un approccio integrato basato su rilievi di campo, analisi GIS e modellazione numerica mediante il modello bidimensionale ORSA2D\_WT. L'analisi del database degli elementi legnosi evidenzia una marcata eterogeneità nelle caratteristiche morfometriche e qualitative, nonché una distribuzione spaziale selettiva lungo l'asta fluviale. In particolare, si osserva una progressiva concentrazione degli elementi più robusti e strutturalmente integri nei tratti di valle, mentre quelli più degradati o di dimensioni ridotte tendono a essere trattenuti nei settori di monte. Gli accumuli risultano caratterizzati da elevata porosità e da una forte variabilità nel numero di componenti, riflettendo processi di intrappolamento controllati dalla morfologia del canale e dalla presenza di discontinuità locali. L'analisi comparata delle ortofoto pre- e post-evento ha consentito di individuare le principali aree di reclutamento, evidenziando la stretta connessione tra gli schianti forestali, instabilità dei versanti e dinamica fluviale. Tali aree rappresentano le principali sorgenti di materiale legnoso mobilizzato durante l'evento. La simulazione numerica ha permesso di ricostruire le traiettorie di trasporto e le zone preferenziali di deposizione, evidenziando una mobilità fortemente selettiva. I risultati mostrano come la posizione iniziale degli elementi e la morfologia locale costituiscono i principali fattori di controllo, mentre le dimensioni geometriche, pur rilevanti, non determinano da sole il comportamento del legname. Le traiettorie simulate risultano in buona coerenza con le osservazioni di campo, confermando la capacità del modello di rappresentare i principali meccanismi fisici del trasporto. Nel complesso, il lavoro fornisce una ricostruzione integrata della dinamica del materiale legnoso durante un evento estremo e contribuisce alla comprensione dei processi che controllano mobilità, accumulo e interazione con la morfologia nei torrenti montani. I risultati evidenziano il ruolo determinante della morfologia del canale nel controllo della distribuzione del legname e sottolineano il potenziale dell'approccio integrato adottato come supporto alla gestione del rischio idraulico e alla pianificazione degli interventi in contesti montani ad alta sensibilità geomorfologica.

# CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

Il materiale legnoso presente negli alvei fluviali rappresenta un elemento chiave per la comprensione del funzionamento idromorfologico ed ecologico dei corsi d'acqua. Numerosi studi hanno evidenziato come il legname influenzi la forma dell'alveo, la dinamica dei sedimenti, la diversità degli habitat e la funzionalità complessiva degli ecosistemi fluviali (Gurnell et al., 2002; Piégay & Gurnell, 1997; Wohl, 2013). La sua presenza può apportare benefici significativi, ma può anche costituire un potenziale fattore di rischio in presenza di infrastrutture vulnerabili o sezioni idraulicamente critiche. Per questo motivo, la quantificazione, la localizzazione e la comprensione delle dinamiche di trasporto del materiale legnoso assumono un ruolo centrale nella gestione dei corsi d'acqua.

Negli ultimi anni, l'evoluzione delle tecnologie basate su sistemi GIS ha reso possibile l'acquisizione, l'organizzazione e l'analisi spaziale di grandi quantità di dati, permettendo di individuare e mappare la distribuzione del materiale legnoso lungo i corsi d'acqua e di analizzarne i pattern spaziali. Parallelamente, lo sviluppo di modelli numerici bidimensionali ha consentito di simulare i processi di reclutamento, trasporto e deposizione del legname, offrendo strumenti utili per indagare le dinamiche di mobilitazione e accumulo in differenti condizioni idrologiche (Kang et al., 2021; Persi et al., 2019; Ruiz-Villanueva et al., 2014). Sebbene tali modelli presentino inevitabilmente un certo grado di incertezza, essi rappresentano strumenti fondamentali per supportare la pianificazione territoriale e la gestione del rischio idraulico.

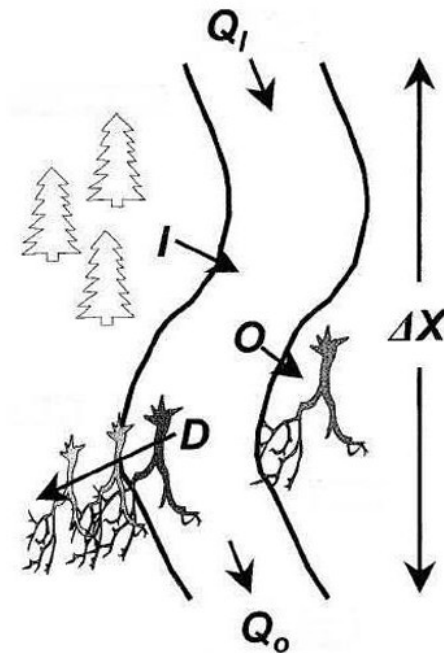
## 1.1 Definizione e origine del materiale legnoso in alveo

Il termine Large Wood (LW) viene comunemente utilizzato per indicare gli elementi legnosi con diametro pari o superiore a 10 cm e lunghezza pari o superiore a 1 m (Gurnell et al., 2002). Il legname presente nei corsi d'acqua può avere origine da molteplici processi naturali e antropici. I principali contributi naturali includono la caduta di alberi in seguito a instabilità delle sponde, erosione laterale o eventi meteorologici estremi, nonché il trasporto da versante innescato da frane, colate detritiche o smottamenti che coinvolgono aree boscate (Martin & Benda, 2001). A questi si aggiunge la mobilitazione di tronchi già presenti in alveo durante eventi di piena. Infine, le attività antropiche, come tagli boschivi o la realizzazione di opere idrauliche, possono influenzare in modo significativo la disponibilità e la dinamica del trasporto del legname (Wohl, 2020).

Studi condotti in bacini montani evidenziano come una quota significativa degli elementi legnosi presenti in alveo conservi ancora la ceppaia o porzioni dell'apparato radicale, indicando un'origine

prevalentemente legata a fenomeni di instabilità delle sponde o dei versanti, piuttosto che a processi di frammentazione secondaria durante il trasporto fluviale (Andreoli et al., 2007).

La dinamica complessiva del materiale legnoso in alveo può essere descritta attraverso il concetto di Large Wood budget, che schematizza i principali flussi di ingresso, uscita e trasformazione del legname all'interno di un tratto di corso d'acqua. Tale schema, proposto da Martin & Benda (2001), è riportato in Figura 1.1.



**Figura 1.1** Dinamica del materiale legnoso in alveo (Martin & Benda, 2001)

La **Figura 1.1** rappresenta il bilancio del materiale legnoso (LW budget) riferito a una porzione di alveo  $\Delta x$  e a un intervallo temporale  $\Delta t$ . In questo schema, il termine  $Q_i$  rappresenta l'apporto di legname proveniente da monte, mentre  $Q_o$  indica l'uscita verso valle per effetto del trasporto fluviale. Il termine  $I$  descrive il reclutamento laterale di materiale legnoso, principalmente associato alla vegetazione riparia e ai processi di instabilità delle sponde, mentre  $O$  rappresenta le aree di accumulo temporaneo all'interno dell'alveo o della piana inondabile. Il termine  $D$  tiene conto dei processi di degradazione naturale del legname, legati a frammentazione meccanica e decomposizione biologica. Sulla base di questi contributi, la variazione dello stock di legname presente in alveo può essere espressa dalla seguente relazione (Pecorari et al., 2007):

$$\Delta S_c = [(I - O) * \Delta x + (Q_i - Q_o) - D] \Delta t$$

**Equazione 1.1** Bilancio dello stock di legname in alveo

dove  $\Delta Sc$  rappresenta la variazione del volume di materiale legnoso immagazzinato nel tratto considerato. Questa formulazione consente di quantificare in modo integrato la dinamica del legname fluviale, evidenziando il ruolo relativo dei principali processi di input da monte, output verso valle, reclutamento laterale, accumulo temporaneo e degradazione, e fornisce un quadro concettuale utile per interpretare l'evoluzione spaziale e temporale del materiale legnoso nei corsi d'acqua montani.

## 1.2 Dinamiche di trasporto e contesti morfologici

La capacità della corrente di mobilizzare e trasportare il materiale legnoso è strettamente legata alle condizioni idrauliche del corso d'acqua e alle dimensioni degli elementi stessi. Nei torrenti montani, caratterizzati da sezioni ristrette, forte confinamento laterale e morfologia complessa, i tronchi di grandi dimensioni risultano generalmente poco mobili: la loro fluitazione è infatti limitata dalla ridotta profondità delle piene e dalla presenza di numerosi ostacoli naturali, quali massi, irregolarità del fondo e restringimenti del canale (Kramer & Wohl, 2017). Al contrario, nei grandi fiumi di pianura, il trasporto del legname è controllato prevalentemente dal tirante idrico raggiunto durante gli eventi di piena, che consente la messa in galleggiamento e la mobilizzazione anche di elementi di grandi dimensioni. Tali differenze determinano una marcata segregazione morfologica del legname nei diversi contesti fluviali, con modalità di trasporto, deposizione e accumulo fortemente dipendenti dalla tipologia del sistema fluviale (Wohl, 2020), come illustrato in Figura 1.2.

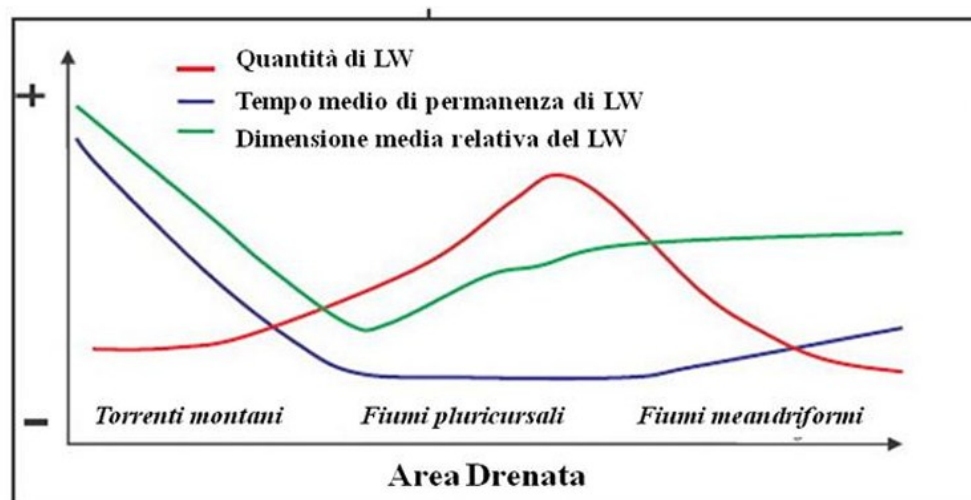


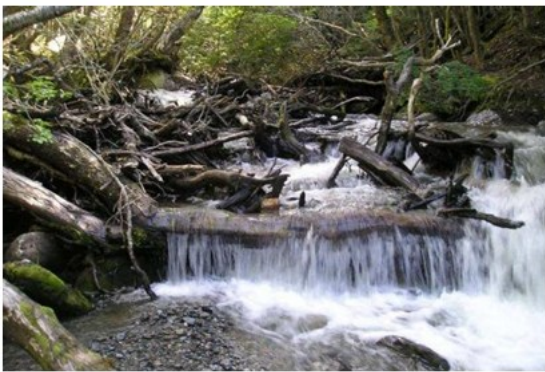
Figura 1.2 Il materiale legnoso in un sistema fluviale (Piégay, 2003)

Nella **Figura 1.2**, lungo l'asse delle ascisse, sono rappresentati tre principali contesti morfologici fluviali, che differiscono per assetto geometrico, condizioni idrauliche e modalità di trasporto del materiale legnoso. I torrenti montani sono caratterizzati da canali stretti, elevate pendenze e alta

energia specifica; in questi ambienti il trasporto del legname è generalmente episodico e confinato a eventi di piena di elevata intensità, mentre gli elementi legnosi risultano spesso di grandi dimensioni e scarsamente mobili. I fiumi pluricursali presentano invece canali intrecciati, barre ghiaiose diffuse ed elevata variabilità morfologica, condizioni che favoriscono la frequente ritenzione del legname su barre, isole fluviali e canali secondari. Nei fiumi meandrici, infine, la minore pendenza e la geometria sinuosa del canale determinano una maggiore continuità del trasporto del legname, con accumuli che si sviluppano preferenzialmente lungo le sponde concave e nelle zone di riflusso del flusso.

### 1.3 Formazione degli accumuli e ruolo morfologico

Quando un elemento legnoso si deposita in alveo o nella piana alluvionale, può agire come un vero e proprio elemento di intercettazione, trattenendo ulteriore materiale flottante e favorendo la progressiva formazione di accumuli di legname (log jams) (Abbe & Montgomery, 2003). Nei torrenti montani ripidi e fortemente confinati, tali accumuli possono arrivare a occupare l'intera sezione del canale, dando origine a dighe temporanee che alterano localmente il regime di deflusso (Figura 1.3). Nei fiumi pedemontani e di pianura, al contrario, il legname tende a disperdersi maggiormente all'interno del letto fluviale (Figura 1.4) o a concentrarsi in corrispondenza di specifiche unità morfologiche, quali isole fluviali, barre ghiaiose e tratti meandrici.



**Figura 1.3** Accumuli di legname in un torrente alpino  
(Pecorari et al., 2007)



**Figura 1.4** Il legname in un fiume con letto in ghiaia  
(Pecorari et al., 2007)

Gli accumuli di legname esercitano un'influenza rilevante sulla morfologia e sulla dinamica fluviale, poiché aumentano la resistenza al flusso, inducono rigurgiti idraulici a monte e favoriscono processi di sedimentazione localizzata, contribuendo alla creazione di una maggiore eterogeneità morfologica (Collins et al., 2012). La presenza di legname svolge inoltre un ruolo chiave nella stabilizzazione

delle sponde, nella formazione di pozze e nella diversificazione degli habitat acquatici, incrementando la complessità strutturale del canale e la funzionalità ecologica del sistema fluviale (Wohl, 2013). L'insieme di questi processi è sintetizzato in Figura 1.5.

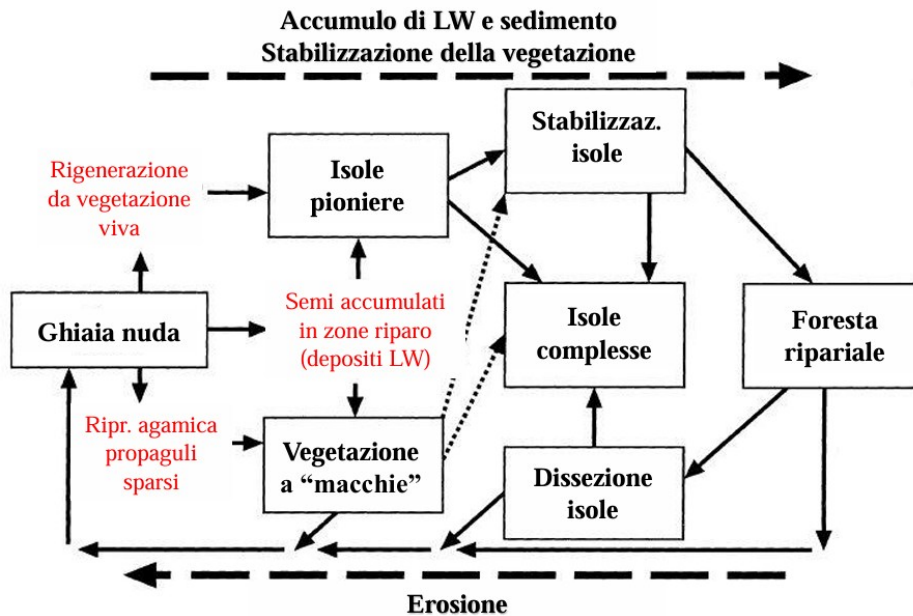


Figura 1.5 Ruolo del legname in un sistema fluviale (modificato da Gurnell et al., 2012)

## 1.4 Gestione del legname e criticità

La letteratura scientifica concorda nel riconoscere al legname un ruolo determinante nel modellare la morfologia fluviale e nel sostenere la qualità ecologica dei corsi d'acqua. Numerosi studi hanno dimostrato come la presenza di tronchi, ceppaie e accumuli introduca una resistenza aggiuntiva al flusso, modificando localmente la velocità della corrente e generando discontinuità idrauliche che favoriscono la formazione di pozze, salti e zone di ristagno. Tali elementi agiscono inoltre come punti di ancoraggio in grado di trattenere e redistribuire i sedimenti, contribuendo alla costruzione di barre, isole e piccoli terrazzi alluvionali. In questo modo, il legname incrementa la complessità fisica del canale e ne diversifica la struttura, rendendo il sistema fluviale più dinamico e articolato (Gurnell et al., 2002).

Parallelamente, queste modificazioni morfologiche si riflettono direttamente sulla funzionalità ecologica del corso d'acqua. Le strutture create dal legname generano una varietà di habitat che difficilmente si svilupperebbero in sua assenza, quali pozze profonde che fungono da rifugio durante i periodi di magra, zone d'ombra e di calma idraulica favorevoli allo sviluppo dei macroinvertebrati e microhabitat essenziali per numerose specie ittiche. Il legname svolge inoltre un ruolo chiave nell'intrappolare materiale organico e nutrienti, alimentando la rete trofica e sostenendo processi

naturali di autodepurazione. Anche la vegetazione ripariale trae beneficio dalla sua presenza, poiché gli accumuli contribuiscono alla stabilizzazione dei sedimenti e alla creazione di superfici idonee alla colonizzazione di specie pioniere (Wohl, 2013).

Nel complesso, come evidenziato dalla letteratura, il legname non rappresenta semplicemente un elemento trasportato dal fiume, ma una componente strutturale che contribuisce attivamente alla costruzione e al mantenimento della forma e della funzionalità ecologica del sistema fluviale. La sua presenza favorisce lo sviluppo di ambienti più eterogenei e resilienti, capaci di sostenere livelli elevati di biodiversità.

Alla luce di tali evidenze, le linee guida operative più recenti, come quelle della Regione Piemonte (2020) e della Protezione Civile della Provincia di Alessandria, raccomandano un approccio gestionale selettivo, orientato alla rimozione degli accumuli potenzialmente pericolosi e alla conservazione del legname funzionale all'equilibrio morfologico ed ecologico del corso d'acqua (Provincia di Alessandria - Protezione Civile, 2019; Regione Piemonte - Direzione Opere Pubbliche, 2020).

L'identificazione del materiale legnoso potenzialmente pericoloso rappresenta un passaggio fondamentale nella valutazione del rischio idraulico associato al trasporto di LW. In letteratura, la pericolosità degli elementi viene generalmente valutata attraverso parametri geometrici (lunghezza, diametro, presenza di radici), stato di conservazione, grado di imbibizione e posizione rispetto all'alveo attivo (Mazzorana et al., 2009; Ruiz-Villanueva et al., 2016). In particolare, gli elementi di grandi dimensioni, dotati di apparato radicale o con lunghezze paragonabili alla larghezza dell'alveo, sono considerati maggiormente critici poiché più inclini a generare occlusioni presso ponti, briglie o restringimenti morfologici.

A livello scientifico, negli ultimi anni si è sviluppato un approccio integrato che combina rilievi di campo ad alta risoluzione (inventari di legname, misure dendrometriche, fotogrammetria da drone, LiDAR terrestre) con modelli numerici dedicati al trasporto del legname, in grado di simulare traiettorie, accumuli e interazioni con le opere idrauliche (Mazzorana et al., 2011; Ruiz-Villanueva et al., 2014). Questo collegamento è essenziale: i dati raccolti sul terreno forniscono le condizioni iniziali e i parametri fisici necessari alla modellazione, mentre i modelli consentono di valutare scenari di piena, probabilità di accumulo e possibili punti critici lungo l'asta fluviale.

L'integrazione tra osservazioni dirette e modellazione numerica rappresenta oggi lo standard metodologico per la gestione del rischio associato al trasporto di materiale legnoso, poiché permette di identificare gli elementi più pericolosi, prevederne il comportamento durante eventi di piena e supportare la pianificazione di interventi mirati.

## 1.5 La Tempesta Vaia come caso emblematico

La Tempesta Vaia, che tra il 27 e il 30 ottobre 2018 ha interessato l'arco alpino nord-orientale, rappresenta uno degli eventi meteorologici più distruttivi mai registrati in Italia in relazione agli ecosistemi forestali e ai sistemi fluviali montani. Raffiche di vento con velocità superiori ai 200 km/h hanno causato schianti forestali diffusi, frane superficiali e diffuse instabilità dei versanti, determinando un apporto eccezionale di materiale legnoso ai corsi d'acqua. Secondo le stime ufficiali, l'evento ha interessato circa 42.500 ettari di superficie forestale, con un volume complessivo di legname schiantato pari a 8,7 milioni di m<sup>3</sup>, configurandosi come il singolo evento di maggiore impatto mai documentato sugli ecosistemi forestali italiani (Chirici et al., 2019). L'elevata intensità degli schianti ha profondamente alterato la struttura e la composizione dei popolamenti forestali, incrementando in modo significativo la quantità di legname potenzialmente mobilizzabile dai corsi d'acqua durante e nelle fasi successive all'evento. Gli effetti di Vaia non si sono tuttavia limitati agli ecosistemi forestali: la repentina immissione di grandi quantità di materiale legnoso ha influenzato in modo rilevante anche la dinamica fluviale. Studi condotti in bacini dolomitici hanno evidenziato come l'evento abbia innescato processi di erosione accelerata, occlusioni temporanee del deflusso, deviazioni del flusso e modificazioni morfologiche persistenti, con la formazione di accumuli di legname in grado di condizionare l'evoluzione degli alvei anche nei mesi successivi all'evento (Brenna et al., 2020).

In questo contesto, la Tempesta Vaia rappresenta non solo un evento di eccezionale impatto ambientale, ma anche un'opportunità unica per lo studio delle dinamiche di trasporto del materiale legnoso nei sistemi fluviali montani. L'improvvisa disponibilità di grandi volumi di legname, associata a condizioni idrologiche estreme, ha infatti generato un contesto sperimentale difficilmente replicabile, offrendo la possibilità di osservare e analizzare processi di reclutamento, mobilizzazione e accumulo del legname su scale spaziali e temporali raramente documentate in letteratura. All'interno di questo quadro, il bacino del Tegnias rappresenta un caso di studio particolarmente significativo. La combinazione tra una morfologia fortemente incisa, un'elevata copertura forestale e l'eccezionale intensità dell'evento meteorologico ha determinato un apporto straordinario di materiale legnoso al sistema fluviale, rendendo il torrente un laboratorio naturale ideale per l'analisi dei processi di reclutamento, trasporto e deposizione del legname in condizioni estreme. L'eccezionale quantità di materiale legnoso mobilizzato dalla Tempesta Vaia ha inoltre evidenziato la necessità di sviluppare strumenti in grado di prevedere non solo i volumi trasportati, ma anche le traiettorie, i punti di accumulo e le possibili interazioni con infrastrutture critiche. Negli ultimi anni, la ricerca scientifica ha quindi sviluppato approcci integrati che combinano rilievi di campo ad alta risoluzione con modelli numerici dedicati al trasporto del legname, consentendo di confrontare le

simulazioni con dati osservati durante eventi di piena. Un contributo significativo in questa direzione è rappresentato dal lavoro di Ennouini et al. (2025), che utilizza i dati di campo acquisiti da Ravazzolo et al. (2015) mediante tracciamento di tronchi con tag RFID (Radio Frequency Identification tags) e dispositivi GPS nel fiume Tagliamento per validare il modello numerico bidimensionale ORSA2D\_WT. Attraverso il confronto tra osservazioni di campo e simulazioni numeriche, lo studio valuta la capacità del modello di riprodurre i principali processi di trasporto del materiale legnoso, quali l'innesco del moto, le traiettorie e le distanze di trasporto. Questo approccio dimostra come la modellazione numerica, se supportata da dati di campo accurati, possa diventare uno strumento essenziale per comprendere e prevedere la dinamica del legname in condizioni di piena, fornendo un supporto operativo alla gestione del rischio e alla pianificazione degli interventi (Ennouini et al., 2025).

## CAPITOLO 2 - OBIETTIVI

La Tempesta Vaia ha rappresentato uno degli eventi meteorologici più intensi e distruttivi che abbiano interessato i bacini montani dell'arco alpino negli ultimi decenni. Le precipitazioni eccezionali e i venti di tempesta hanno provocato estesi schianti forestali, instabilità dei versanti e un apporto straordinario di materiale legnoso ai corsi d'acqua, alterandone in modo significativo il comportamento idraulico e morfologico. In molti contesti montani, tali apporti hanno contribuito alla formazione di accumuli instabili, ostruzioni locali e rigurgiti di piena, mettendo in evidenza i limiti degli strumenti tradizionali di gestione del rischio idraulico quando il sistema fluviale è sottoposto a sollecitazioni estreme.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro di tesi, che ha come obiettivo la ricostruzione e l'interpretazione della dinamica di reclutamento, trasporto e deposizione del materiale legnoso nel torrente Tognas durante la Tempesta Vaia, mediante un approccio integrato basato su dati di campo, analisi GIS e modellazione numerica. Il Tognas rappresenta un caso di studio particolarmente significativo poiché combina un bacino montano fortemente confinato, una perturbazione meteorologica eccezionale e la disponibilità di un database dettagliato sugli elementi legnosi rinvenuti in alveo dopo l'evento.

Un primo obiettivo del lavoro consiste nell'analisi quantitativa e qualitativa del materiale legnoso osservato nel canale del Tognas a seguito di Vaia, a partire da un database contenente le principali caratteristiche fisiche e posizionali degli elementi. Per ciascun elemento legnoso (LW) sono state considerate informazioni relative alla specie arborea, alla localizzazione lungo il canale, all'orientamento rispetto al flusso, alla presenza o assenza di rami e fogliame e alle dimensioni geometriche. L'elaborazione di questi dati consente di individuare pattern ricorrenti nella distribuzione e nelle caratteristiche del legname, valutare gli effetti di selezione esercitati dal trasporto fluviale e analizzare l'influenza delle proprietà del materiale sulla sua mobilità e deposizione durante l'evento di piena.

Un secondo obiettivo riguarda la ricostruzione spaziale delle aree di reclutamento del legname mobilizzato durante Vaia. A tal fine sono state utilizzate ortofoto pre- e post-evento in ambiente GIS, che hanno permesso di individuare le zone in cui la copertura forestale è stata rimossa, delimitando le superfici coinvolte da schianti, instabilità dei versanti ed erosioni di sponda e classificare tali aree come potenziali sorgenti di materiale legnoso. Questa analisi consente di stabilire un legame spaziale tra le aree di provenienza del legname e gli elementi rinvenuti in alveo, fornendo una base oggettiva per interpretare le modalità di reclutamento e alimentare la successiva modellazione.

In continuità con questa analisi, un passaggio fondamentale del lavoro consiste nell'individuazione di un insieme di elementi legnosi rappresentativi, selezionati sulla base delle caratteristiche osservate nei rilievi di campo e della loro appartenenza alle aree di potenziale reclutamento identificate tramite GIS. Tale scelta consente di stabilire un collegamento metodologico esplicito tra dati osservati, analisi spaziale e modellazione numerica, garantendo che i parametri utilizzati nel modello derivino direttamente dall'integrazione delle diverse fasi del lavoro.

Il terzo obiettivo del lavoro consiste in una preliminare simulazione numerica dell'evento di piena associato alla Tempesta Vaia, mediante l'uso del modello ORSA2D\_WT in grado di riprodurre sia le condizioni idrauliche eccezionali sia il comportamento di rappresentativi tronchi trasportati. La simulazione è finalizzata a rappresentare i percorsi di trasporto, individuare le principali zone di accumulo e confrontare i risultati modellati con le osservazioni reali effettuate nel canale del Tegnass. Questo confronto permette di valutare la capacità del modello di descrivere un evento estremo reale e di comprendere i meccanismi fisici che hanno controllato la dinamica del legname.

Nel loro insieme, questi obiettivi permettono di ricostruire in modo coerente e integrato la dinamica del materiale legnoso nel bacino del Tegnass durante la Tempesta Vaia, combinando osservazioni dirette, analisi spaziali e modellazione numerica.

## CAPITOLO 3 – MATERIALI E METODI

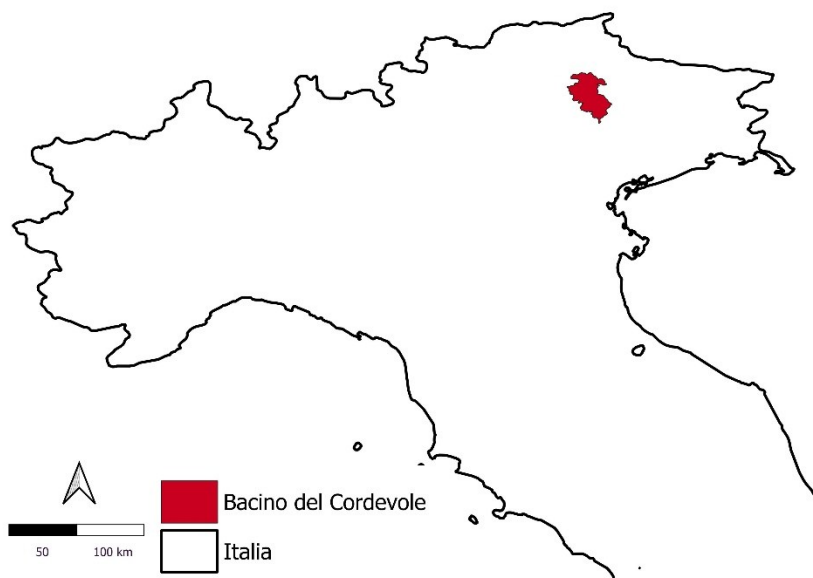
### 3.1 Inquadramento dell'area di studio

L'area di studio è inserita nel sistema idrografico del torrente Cordevole, principale tributario montano del fiume Piave. Quest'ultimo drena un ampio settore delle Alpi orientali caratterizzato da marcati contrasti altimetrici, diffuse litologie carbonatiche mesozoiche e una morfologia complessa, fattori che influenzano in modo significativo la risposta idrologica dei bacini affluenti (Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, 2021). Il bacino del Cordevole presenta una superficie complessiva pari a 853 km<sup>2</sup> e si sviluppa interamente all'interno delle Dolomiti Bellunesi, un contesto geologico dominato da potenti successioni carbonatiche, pareti rocciose molto ripide e valli profondamente incise, modellate dall'azione combinata del glacialismo quaternario, dei processi gravitativi e dell'incisione fluviale (APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2004).

Dal punto di vista climatico, il settore dolomitico dell'Agordino rientra nel dominio alpino umido, caratterizzato da precipitazioni annue elevate e concentrate prevalentemente nei mesi autunnali e primaverili. Le medie pluviometriche annue si collocano generalmente tra 1.200 e 1.600 mm/anno, con valori massimi localizzati nelle testate vallive e sui versanti maggiormente esposti ai flussi umidi meridionali (ARPAV – Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto, 2015). Eventi meteorologici intensi, spesso associati a configurazioni di stau orografico o a sistemi ciclonici di origine mediterranea, possono generare precipitazioni di elevata intensità e breve durata, responsabili di risposte idrologiche rapide e di significativi processi di trasporto solido e legnoso (Borga et al., 2014a; Picco et al., 2016).

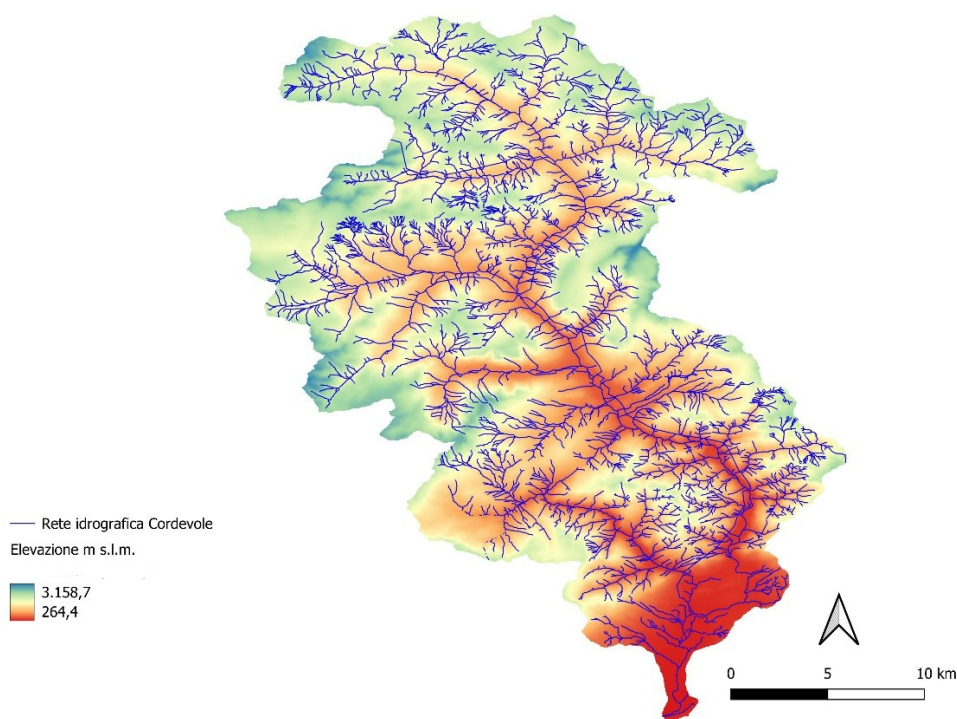
Il regime idrologico dei corsi d'acqua del bacino del Cordevole riflette la combinazione di precipitazioni abbondanti, forti dislivelli altimetrici e bacini con limitata capacità di immagazzinamento. I torrenti dolomitici sono generalmente caratterizzati da pendenze elevate, marcata incisione e una dinamica fluviale ad alta energia, con portate che possono aumentare rapidamente in occasione di eventi di pioggia intensa. Studi condotti sui bacini montani dell'area evidenziano come la stretta interazione tra processi di versante, copertura forestale estesa e morfologia incisa determini tempi di risposta molto rapidi e una spiccata predisposizione alla mobilitazione di materiale solido e legnoso (Marchi et al., 2010).

La Figura 3.1 mostra l'inquadramento generale del bacino del Cordevole.



**Figura 3.1** Inquadramento del bacino del Cordevole

La Figura 3.2 fornisce una rappresentazione integrata del bacino del Cordevole, in cui il modello digitale del terreno (DTM) permette di evidenziare la distribuzione altimetrica e le principali caratteristiche morfologiche dell'area, mentre la sovrapposizione del reticolo idrografico consente di individuare l'organizzazione della rete idrografica e la sua relazione con la struttura del paesaggio. L'unione di queste informazioni offre una visione d'insieme chiara e coerente del bacino, utile per comprendere i processi idrologici e geomorfologici che ne governano il funzionamento.



**Figura 3.2** rete idrografica e DTM del bacino del Cordevole

L'insieme di queste caratteristiche (morfologia fortemente incisa, copertura forestale continua, precipitazioni elevate e dinamiche idrologiche rapide) rende i bacini montani del Cordevole sistemi ad elevata energia specifica, particolarmente sensibili agli effetti degli eventi meteorologici estremi e fortemente predisposti alla produzione e al trasporto di materiale solido e legnoso.

### **3.2 Il torrente Tegas**

Il torrente Tegas è un corso d'acqua tipicamente montano dell'Agordino e rappresenta uno dei principali affluenti del Cordevole nel settore dolomitico nord-orientale del Veneto. Il bacino si sviluppa interamente all'interno delle Dolomiti Bellunesi, in un contesto geologico dominato da potenti successioni carbonatiche mesozoiche e da pareti rocciose estremamente ripide, modellate dall'azione combinata dei processi glaciali, gravitativi e fluviali (APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2004).

Il torrente nasce alle pendici settentrionali della Croda Granda e percorre inizialmente la valle di Angheraz, un ambiente fortemente incassato compreso tra il gruppo dell'Agner e l'altopiano delle Pale di San Martino. In questo tratto, la morfologia è caratterizzata da versanti subverticali, colate detritiche attive e da un alveo stretto, condizioni che influenzano in modo diretto la dinamica idrologica e sedimentaria del sistema. All'altezza di Col di Pra, il Tegas piega verso est ed entra nella Valle di San Lucano, una delle valli più profonde delle Dolomiti, con pareti rocciose che superano i 1500 m di dislivello. La valle, di origine glaciale, presenta un fondovalle estremamente limitato e un alveo fortemente confinato, che risponde rapidamente agli eventi di precipitazione intensa e favorisce una stretta interazione tra processi di versante e dinamica fluviale (Borga et al., 2014a; Marchi et al., 2010b).

La **Figura 3.3** mostra il percorso del torrente Tegas all'interno della Valle di San Lucano, evidenziando il marcato grado di confinamento laterale e la struttura del fondovalle.



**Figura 3.3** Percorso del torrente Tegnas nella Valle di San Lucano (ortofoto 2025)

Dal punto di vista geologico, il bacino del Tegnas è costituito prevalentemente da dolomie (Figura 3.4), calcari dolomitici e depositi detritici di versante. Tali litologie, caratterizzate da un'elevata fratturazione e da una marcata predisposizione ai processi di instabilità, favoriscono la produzione di materiale solido e legnoso che può essere facilmente mobilizzato verso l'alveo in occasione di eventi meteorologici intensi (Trigila et al., 2018).

La dinamica idraulica del Tegnas è tipica dei corsi d'acqua montani confinati, caratterizzati da pendenze elevate, sezioni trasversali ristrette e tempi di risposta molto rapidi. Studi condotti in bacini dolomitici evidenziano come sistemi fluviali di questo tipo risultino particolarmente sensibili agli eventi estremi, con portate di picco elevate e una significativa capacità di trasporto, anche per elementi legnosi di grandi dimensioni (Borga et al., 2014a).



**Figura 3.4** Dolomia

Dopo aver attraversato la Valle di San Lucano, il torrente raggiunge la zona di fondovalle in corrispondenza di Taibon Agordino, dove confluisce nel Cordevole. In questo tratto terminale la

morfologia del canale si apre leggermente; tuttavia, il sistema mantiene un alveo relativamente stretto e una dinamica fluviale ad alta energia, tipica dei corsi d'acqua montani confinati.

Nel complesso, il Tegnás può essere descritto come un sistema fluviale ad elevata sensibilità geomorfologica, nel quale la combinazione tra morfologia fortemente incisa, substrati rocciosi intensamente fratturati e copertura forestale estesa favorisce il reclutamento e il trasporto di materiale legnoso, in particolare in occasione di eventi estremi come la Tempesta Vaia.

Nel presente lavoro l'analisi è focalizzata su un tratto del torrente Tegnás situato nella porzione centrale della Valle di San Lucano, compreso tra Col di Pra e le aree immediatamente a valle. Questa sezione del corso d'acqua è riconosciuta in letteratura come una delle più dinamiche dell'intero bacino, in quanto caratterizzata da un alveo fortemente confinato, pendenze elevate e una stretta interazione tra processi di versante e dinamica fluviale. Studi condotti nei bacini dolomitici (Borga et al., 2014; Marchi et al., 2010) evidenziano come i sistemi fluviali incisi all'interno di valli glaciali profonde, quali la Valle di San Lucano, rispondano in modo particolarmente rapido agli eventi meteorologici intensi, con portate di picco elevate e una significativa capacità di trasporto solido e legnoso.

Le caratteristiche geologiche del settore, dominate da potenti successioni carbonatiche mesozoiche e da versanti estremamente ripidi soggetti a fratturazione diffusa, favoriscono la produzione e il trasferimento verso l'alveo di materiale detritico e legnoso (APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2004; Trigila et al., 2018). La presenza di colate detritiche attive e di superfici instabili contribuisce ulteriormente a rendere questo tratto un punto chiave per l'osservazione dei processi di reclutamento e mobilizzazione del legname. L'evento Vaia ha confermato la vulnerabilità di questo settore, con numerosi apporti di materiale legnoso e accumuli localizzati in corrispondenza di restringimenti naturali e variazioni di pendenza, come documentato per diversi bacini dolomitici colpiti dalla tempesta (Borga et al., 2014b). Queste evidenze rendono il tratto selezionato un laboratorio naturale ideale per analizzare le dinamiche di trasporto del legname in condizioni estreme e per integrare osservazioni di campo con strumenti di modellazione numerica, in linea con gli obiettivi del presente studio.

### **3.3 Dati disponibili**

Il presente lavoro si basa su un database in formato Excel contenente il rilievo dettagliato degli elementi legnosi rinvenuti nel torrente Tegnás a seguito della Tempesta Vaia. Il rilievo e l'intero set di dati sono stati forniti dal Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF) dell'Università degli Studi di Padova, che ha condotto la campagna di raccolta e sistematizzazione delle informazioni. Per ciascun elemento sono state raccolte informazioni relative alla tipologia (elemento singolo,

accumulo, ceppaia, radice o combinazioni di questi), alle dimensioni del singolo tronco (diametro e lunghezza) e, ove presenti, alle dimensioni dell'accumulo e della radice o ceppaia. Il database include inoltre dati sulla specie arborea (latifolia, conifera o abete rosso, quando riconoscibile), sull'orientamento rispetto alla direzione del flusso, sulla posizione all'interno dell'alveo (barra, barra alta, canale attivo, sponda o canale secondario), sulla presenza di rami e foglie e sullo stato di conservazione dell'elemento (giovane, maturo, marcescente o vecchio). Questo insieme articolato di informazioni costituisce la base per la caratterizzazione fisica e spaziale del materiale legnoso presente in alveo.

Oltre ai dati di rilievo, è stato utilizzato l'idrogramma dell'evento Vaia (Figura 3.5). L'idrogramma in figura riporta l'evoluzione temporale della portata tra il 27 e il 31 ottobre 2018, evidenziando la rapida crescita dei deflussi e il raggiungimento di valori di picco che arrivano a sfiorare i 180 m<sup>3</sup>/s. Tale informazione è fondamentale per interpretare i processi di mobilitazione e trasporto del materiale legnoso osservati nel tratto di studio, poiché consente di collegare quantitativamente le condizioni idrauliche estreme ai pattern di accumulo e deposizione rilevati in campo.

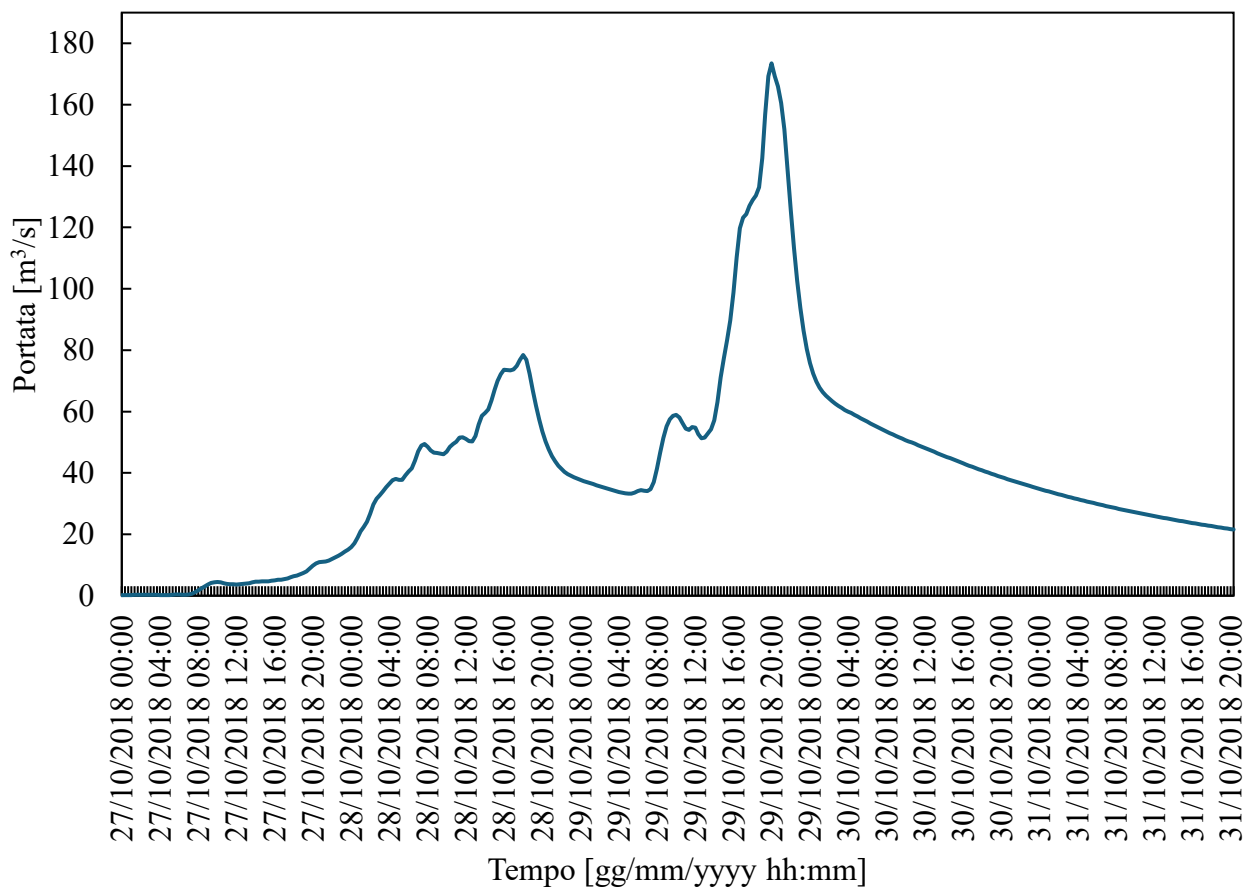


Figura 3.5 Idrogramma della tempesta Vaia

A supporto del database sono state utilizzate ortofoto antecedenti (2015) e successive (2019) all'evento, impiegate per contestualizzare spazialmente gli elementi rilevati, verificarne la posizione all'interno del canale e individuare le principali modificazioni indotte dalla tempesta, quali schianti forestali, instabilità dei versanti ed erosioni di sponda. Le ortofoto sono state caricate in ambiente GIS insieme agli shapefile relativi al confine di bacino, al reticolo idrografico e al tracciato del canale, necessari per la corretta collocazione spaziale degli elementi del database e per il supporto alle analisi descritte nei paragrafi successivi.

### **3.4 Metodologia di analisi**

L'elaborazione dei dati è stata condotta mediante l'integrazione del database degli elementi legnosi rilevati in campo con l'analisi delle ortofoto disponibili per il tratto di studio. Le procedure adottate hanno consentito di organizzare in modo sistematico le informazioni raccolte e di individuare, attraverso un'interpretazione spaziale in ambiente GIS, le aree del canale caratterizzate da modificazioni morfologiche potenzialmente riconducibili ai processi di reclutamento del materiale legnoso.

#### **3.4.1 Analisi del database del materiale legnoso**

L'analisi del materiale legnoso è stata sviluppata a partire dai file Excel dedicati agli elementi singoli e agli accumuli, nei quali sono stati sistematizzati i dati raccolti durante il rilievo di campo. Le informazioni sono organizzate secondo un formato omogeneo che consente una lettura immediata e una successiva elaborazione quantitativa, facilitando la distinzione tra elementi isolati e accumuli complessi.

Per ciascun elemento sono state registrate le principali caratteristiche morfometriche e qualitative, comprendenti la tipologia (elemento singolo, accumulo, radice o ceppaia, nonché eventuali combinazioni), le dimensioni geometriche, la specie arborea (latifolia, conifera, abete rosso o non identificata), l'orientamento rispetto alla direzione del flusso (parallelo, perpendicolare o obliquo), la posizione all'interno dell'alveo (barra, barra alta, canale attivo o sponda), la presenza di rami e foglie e lo stato di conservazione dell'elemento (giovane, maturo o marcescente).

Per maggiore chiarezza, la Tabella 3.1 sintetizza la struttura del database e le categorie informative utilizzate.

**Tabella 3.1** Struttura del database degli elementi legnosi rilevati nel torrente Tognas

Categoria	Contenuto
Tipologia di elemento	Singolo, accumulo, radice, ceppaia, combinazioni
Dimensioni	Diametro e Lunghezza; per accumuli: dimensioni complessive
Specie arborea	Latifolia, conifera, abete rosso (solo monte), non identificata
Orientamento	Parallelo, perpendicolare, obliquo rispetto al flusso
Posizione in alveo	Barra, barra alta, canale attivo, sponda
Presenza di rami/foglie	Sì / No
Stato di conservazione	Giovane, maturo, marcescente

### 3.4.2 Analisi delle ortofoto in QGIS e definizione delle aree di reclutamento

Parallelamente alla sistematizzazione del database, è stata condotta un'analisi preliminare delle ortofoto del torrente Tognas antecedenti (2015) (Figura 3.6 (a)) e successive (2019) (Figura 3.6 (b)) all'evento di piena. Le immagini sono state caricate e analizzate in ambiente GIS, consentendo una lettura spaziale coerente e integrata del tratto di studio.



**Figura 3.6** Ortofoto 2015 (a) ortofoto 2019 (b)

L'analisi comparata delle ortofoto pre- e post-evento ha permesso di individuare e delimitare le diverse aree di interesse, caratterizzate da modificazioni morfologiche, perdita o comparsa di copertura vegetale, instabilità localizzate o altre evidenze compatibili con potenziali processi di reclutamento del materiale legnoso. In questa fase preliminare, l'attività si è concentrata esclusivamente sulla segnalazione e sulla mappatura di tali aree, senza procedere a una classificazione dettagliata o a un'interpretazione quantitativa. L'obiettivo è stato infatti quello di costruire una base cartografica preliminare, utile a supportare le successive fasi di analisi e interpretazione, inoltre è stato utile per determinare le caratteristiche fisiche degli elementi che verranno successivamente utilizzate nella simulazione numerica. Per individuare le aree di reclutamento è stata adottata una procedura basata sulla sovrapposizione e sul confronto diretto tra le ortofoto del 2015 e quelle del 2019. La comparazione visiva dei due dataset ha permesso di riconoscere con immediatezza le zone soggette a erosione o a modificazioni significative della morfologia e della copertura vegetale. In particolare, sono state delimitate le porzioni di territorio in cui risultavano evidenti arretramenti di sponda, incisioni localizzate o la rimozione completa della vegetazione ripariale, interpretate come potenziali sorgenti di materiale legnoso mobilizzabile. Questa fase ha consentito di ottenere una mappatura preliminare delle aree di reclutamento, successivamente utilizzata come base informativa per la definizione degli elementi legnosi da inserire nel modello numerico.

La Figura 3.7 mostra il confronto diretto tra l'ortofoto del 2015 e quella del 2019 relative a una delle aree analizzate. Il confronto visivo tra le due immagini mette in risalto l'entità delle modificazioni avvenute nel periodo considerato e conferma la presenza di condizioni favorevoli al reclutamento di materiale legnoso, successivamente considerate nella definizione degli input per la simulazione numerica.



**Figura 3.7** Confronto tra ortofoto del 2015 (sinistra) e ortofoto del 2019 (destra)

### 3.5 Il modello ORSA2D\_WT

Il modello ORSA2D\_WT è un modello idraulico bidimensionale che combina una descrizione euleriana del campo di moto con una rappresentazione lagrangiana degli elementi legnosi. Il modulo idrodinamico risolve le equazioni bidimensionali di Saint-Venant (*shallow water equations*), fornendo la distribuzione spaziale delle profondità e delle velocità di corrente, mentre il modulo WT (*Wood Transport*) simula la dinamica dei singoli elementi legnosi. In questo schema, ciascun tronco è rappresentato come un elemento discreto soggetto all'azione delle forze idrodinamiche, che ne governano l'innescio del moto, il trasporto e l'arresto. Il modello consente quindi di simulare il movimento di elementi legnosi attraverso processi di traslazione e rotazione, tenendo conto delle interazioni con la morfologia dell'alveo e con eventuali ostacoli (per esempio pile di ponti e massi rocciosi) presenti nel dominio di calcolo.

L'applicazione e la validazione del modello sono state presentate da Persi et al. (2019), che hanno utilizzato ORSA2D\_WT per simulare il trasporto non congestionato di elementi legnosi regolari durante un esperimento di campo in scala reale. I risultati mostrano che il modello è in grado di riprodurre in modo soddisfacente le aree di probabile arresto del legname e i pattern generali di mobilizzazione, pur non replicando con precisione le traiettorie dei singoli tronchi. Lo studio evidenzia inoltre l'importanza della corretta stima della densità del legno, parametro che influenza significativamente la mobilità e la distanza percorsa dagli elementi. Viene inoltre sottolineato il ruolo degli ostacoli di grandi dimensioni, come massi affioranti, che nel modello sono rappresentati come elementi capaci di modificare sia il campo di moto sia la dinamica del legname (Persi et al., 2019).

Nel presente lavoro, ORSA2D\_WT è stato utilizzato per simulare la mobilizzazione e il trasporto di dieci elementi legnosi rappresentativi del torrente Tegnias durante l'evento Vaia. Parte dell'idrogramma dell'evento è stato impiegato come condizione al contorno in ingresso (Figura 3.7), costituendo il principale forzante idraulico del modello. Le simulazioni sono state finalizzate a valutare la capacità del tratto di studio di mobilizzare gli elementi legnosi presenti, analizzarne le potenziali traiettorie di trasporto e individuare le zone preferenziali di accumulo. I risultati modellistici sono stati quindi confrontati con le evidenze di campo e con le modificazioni morfologiche osservate nelle ortofoto successive all'evento.

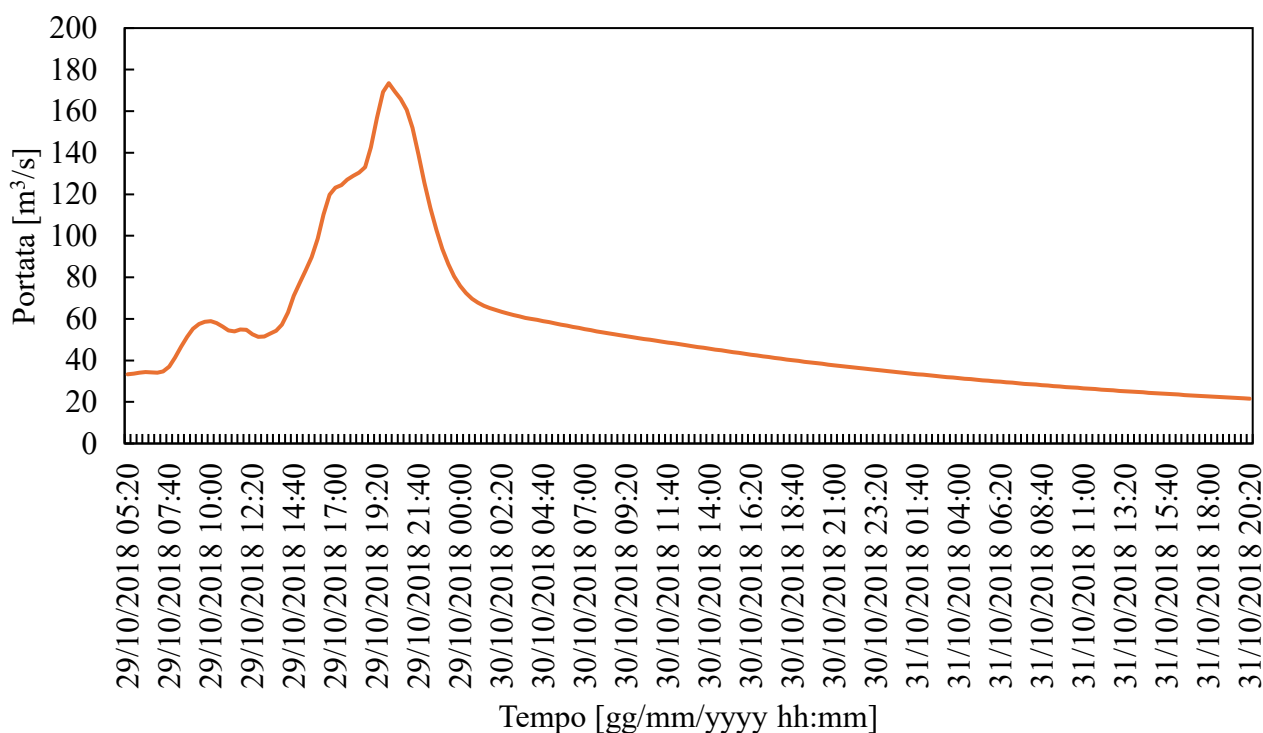


Figura 3.8 Idrogramma della portata simulata

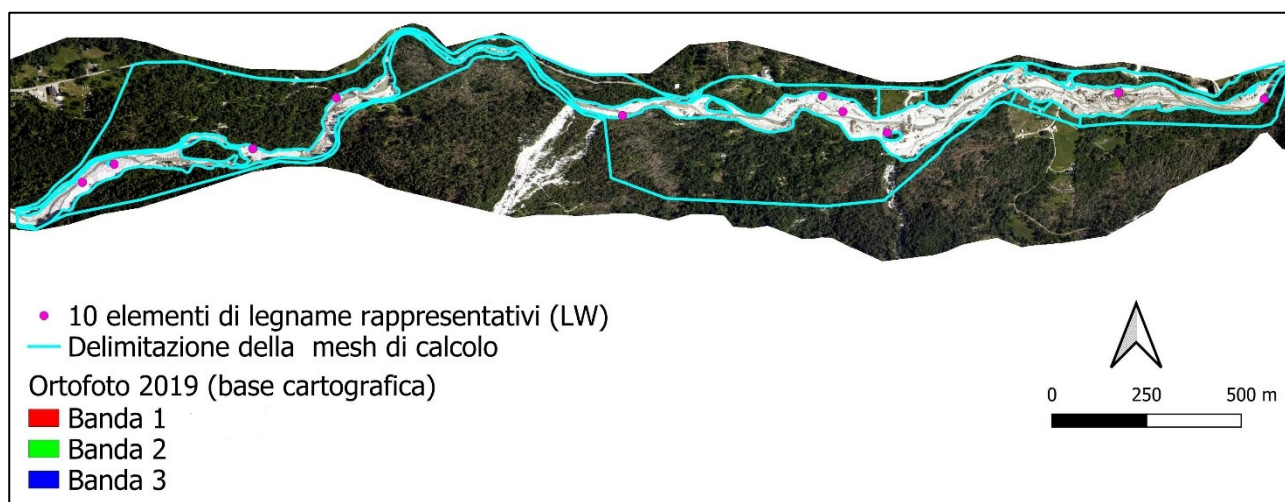
### 3.5.1 Impostazione della simulazione numerica

La simulazione numerica è stata impostata definendo un insieme di dieci elementi legnosi rappresentativi delle condizioni riscontrate nel tratto di studio. Per ciascun elemento sono state specificate le dimensioni geometriche (diametro e lunghezza), l'orientamento rispetto all'asse del canale, la posizione iniziale (canale, sponda o barra) e le coordinate planimetriche di rilascio. La Tabella 3.2 riporta i parametri assegnati ai dieci elementi utilizzati nella simulazione, selezionati in modo da coprire un intervallo realistico di dimensioni e configurazioni osservate nel torrente Tegnas.

Tabella 3.2 Parametri geometrici e posizione dei dieci elementi simulati

Tempo di inserimento	ID elemento	D [m]	L [m]	Orientamento	$\alpha$ [°]	Posizione	X [m s.l.m.]	Y [m s.l.m.]	Z [m s.l.m.]	$\rho_{\text{LEGNO}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
29/10/2018 11:00	1	0,12	3,5	parallelo	0°	canale	726172,4	5130960,7	827,9	774,0
	2	0,15	4	perpendicolare	90°	sponda	727516,7	5131089,1	787,9	
	3	0,18	5	perpendicolare	100°	barra	728216,3	5131043,4	766,0	
29/10/2018 15:40	4	0,22	6	obliquo	30°	canale	728827,7	5131149,0	750,3	
	5	0,25	6,5	obliquo	45°	sponda	729212,8	5131133,0	744,3	
	6	0,28	7	perpendicolare	75°	barra	726088,7	5130912,9	830,3	
	7	0,32	8	parallelo	10°	sponda	728045,4	5131140,3	772,3	
29/10/2018 18:00	8	0,36	9	obliquo	60°	barra	726539,0	5131001,6	818,5	
	9	0,42	10,5	perpendicolare	80°	sponda	726759,5	5131135,4	812,1	
	10	0,5	12	parallelo	20°	canale	728099,0	5131099,4	770,0	

L'immagine GIS riportata in Figura 3.9 mostra la localizzazione dei punti di rilascio all'interno del dominio modellato. I punti sono stati posizionati in corrispondenza di tratti caratterizzati da differenti condizioni morfologiche (canale attivo, barre, sponde), al fine di valutare come la posizione iniziale influenzi la mobilità e le traiettorie degli elementi legnosi durante l'evento di piena. Nella stessa figura viene mostrata anche la delimitazione della mesh utilizzata, nello specifico si tratta di una rete discretizzata composta da poligoni (per ORSA2D\_WT sono triangoli) che suddivide una superficie geometrica continua in elementi finiti.



**Figura 3.9** Posizione iniziale degli elementi legnosi e delimitazione della mesh di calcolo

La simulazione è stata forzata utilizzando l'idrogramma di portata, impiegato come condizione al contorno in ingresso. Tale idrogramma riproduce l'evoluzione temporale della portata associata alla tempesta Vaia e costituisce il forzante idraulico principale per la valutazione della mobilità degli elementi legnosi. La durata della simulazione è stata impostata in modo da coprire l'intero sviluppo dell'onda di piena, includendo sia la fase di crescita sia la fase di recessione. Inoltre, questo tratto è stato selezionato per consentire la simulazione della fase più critica dell'evento, corrispondente al picco di piena, pari a circa  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . La simulazione dell'intero evento non è stata considerata a causa dei tempi di calcolo e delle elevate richieste computazionali del modello. Per questo motivo l'analisi è stata concentrata sulla fase di massima intensità della piena, ritenuta la più significativa ai fini dello studio della mobilitazione e del trasporto del legname.

L'obiettivo dell'impostazione numerica è stato quello di analizzare la mobilitazione potenziale degli elementi legnosi, le loro traiettorie e le aree di arresto preferenziale, confrontando i risultati con le evidenze di campo e con le modificazioni morfologiche osservate nelle ortofoto post-evento. L'utilizzo di elementi con dimensioni e orientamenti differenti ha permesso di valutare l'influenza delle caratteristiche geometriche e della posizione iniziale sulla dinamica del trasporto.

### 3.5.1.1 Creazione di contour map mediante Surfer 10

Nel presente lavoro i risultati della simulazione eseguita con il modello ORSA2D\_WT sono stati successivamente elaborati mediante il software Surfer 10 (Golden Software). Tale ambiente è stato impiegato per la generazione di contour map, costruite a partire dai campi di output del modello numerico. Le mappe prodotte consentono di visualizzare in modo immediato la distribuzione spaziale del tirante idrico durante l'intera simulazione, permettendo una lettura sinottica delle variazioni morfologiche e idrauliche nel dominio. Inoltre, Surfer 10 è stato utilizzato per rappresentare graficamente le traiettorie dei 10 elementi trasportati, integrando i dati di posizione forniti dal modello e restituendo una visualizzazione chiara e coerente del loro percorso all'interno del tratto fluviale analizzato.

### 3.5.1.2 Metodologia di elaborazione dei risultati

Gli output generati dal modello ORSA2D\_WT sono stati elaborati mediante un codice MATLAB sviluppato per estrarre e organizzare in modo sistematico le principali informazioni cinematiche e temporali associate al movimento dei dieci elementi legnosi simulati. L'elaborazione consente di ricostruire, per ciascun elemento, le distanze percorse nelle diverse modalità di trasporto, i tempi trascorsi nei vari stati e le statistiche delle velocità del tronco e del flusso. I risultati ottenuti attraverso questo processo verranno riassunti nella tabella seguente, che ne fornisce una sintesi chiara e confrontabile.

Per ogni elemento, la distanza percorsa in ciascuna modalità di trasporto è ottenuta sommando gli spostamenti elementari tra due campioni temporali consecutivi. Se  $(x_i, y_i)$  e  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  rappresentano le posizioni successive, la distanza elementare è calcolata come:

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

La distanza totale percorsa in uno stato  $s$  (Fermo, Traslà/Rotola o Galleggia) è quindi:

$$D_s = \sum_{i \in s} d_i$$

Dove la somma è effettuata solo sui segmenti in cui il tronco si trova nello stato  $s$ .

Il tempo trascorso in ciascuna modalità è ottenuto a partire dai passi temporali:

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$$

E convertito in minuti:

$$T_s = \frac{1}{60} \sum_{i \in s} t_i$$

Le colonne successive riportano le statistiche della velocità del tronco, calcolata per ogni campione come:

$$V_i = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Dove  $v_x$  e  $v_y$  sono le componenti della velocità del tronco calcolate nel centro di massa del tronco.

Analogamente, la velocità media del flusso è ottenuta da:

$$Vf_i = \sqrt{vf_x^2 + vf_y^2}$$

Dove  $vf_x$  e  $vf_y$  sono rispettivamente la componente orizzontale e verticale della velocità del flusso.

## CAPITOLO 4 – RISULTATI

Il presente capitolo riporta i risultati dell'analisi del materiale legnoso rinvenuto nel torrente Tegas a seguito della Tempesta Vaia, in relazione agli obiettivi definiti nel Capitolo 2. Una prima parte dei risultati deriva dai dati raccolti durante il rilievo di campo e dalle successive elaborazioni grafiche e spaziali condotte in ambiente GIS, che consentono di descrivere in modo quantitativo le caratteristiche qualitative, dimensionali e spaziali del legname presente in alveo e di confrontare i tratti di monte e di valle del corso d'acqua.

A partire dal database compilato dopo l'evento, sono state sviluppate diverse elaborazioni grafiche finalizzate a rappresentare in modo sintetico e comparabile le principali caratteristiche del campione analizzato. Sono stati realizzati grafici a torta per descrivere la distribuzione dello stato di conservazione degli elementi, delle specie arboree e della presenza o assenza di rami e foglie. Le dimensioni del legname sono state analizzate mediante box plot relativi al diametro e alla lunghezza, mentre gli aspetti spaziali sono stati rappresentati tramite istogrammi relativi alla posizione e all'orientamento degli elementi all'interno dell'alveo. Parallelamente, è stata condotta un'analisi specifica sugli accumuli, considerando il numero di elementi che li compongono e la percentuale di volume vuoto al loro interno.

Accanto a queste analisi descrittive, il capitolo presenta anche i risultati della simulazione numerica condotta con il modello ORSA2D\_WT. Tale simulazione, è stata utilizzata per valutare la mobilitazione potenziale degli elementi legnosi durante l'evento di piena, analizzandone le traiettorie e le possibili aree di arresto preferenziale lungo il tratto di studio. L'integrazione dei risultati modellistici nel capitolo consente di affiancare alla descrizione statica del materiale osservato una valutazione dinamica del suo comportamento durante la piena.

### 4.1 Stato di conservazione degli elementi

La Figura 4.1 mostra la distribuzione dello stato di conservazione degli elementi singoli nei tratti di monte e di valle. Nel tratto di monte, il 46% degli elementi è classificato come maturo, il 17% come giovane e il 37% come marcescente. Nel tratto di valle, la componente matura aumenta al 59%, mentre il giovane scende al 13% e il marcescente al 28%.

Il database utilizzato distingue gli elementi in tre categorie qualitative definite sulla base del grado di sviluppo e dello stato di conservazione del legno. Questa classificazione riflette differenze strutturali rilevanti: il legno giovane presenta minore lignificazione e maggiore contenuto idrico; il legno maturo è caratterizzato da una struttura più compatta; il legno marcescente mostra invece avanzati processi di decomposizione e ridotta coesione delle fibre.

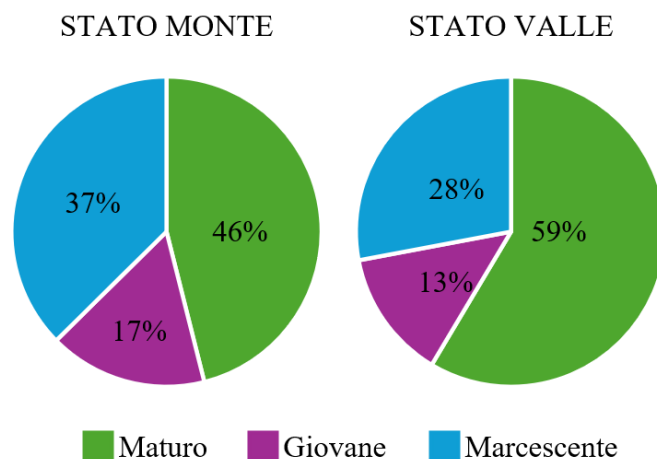


Figura 4.1 Stato di conservazione degli elementi singoli

## 4.2 Caratterizzazione delle specie arboree

I due grafici in Figura 4.2 illustrano la distribuzione delle specie arboree nei tratti di monte e di valle del Tognas, con un dettaglio aggiuntivo sulle conifere di monte. Nel tratto montano, latifoglie e conifere rappresentano rispettivamente il 50% e il 29%, mentre il restante 21% è costituito da elementi non identificati. Tra le conifere, l'abete rosso emerge come specie dominante, rappresentando il 38% di questa categoria. Nel tratto di valle, le latifoglie aumentano al 59%, mentre le conifere si riducono al 15%, con una quota non identificata che sale al 26%. Nel tratto di monte, gli elementi appartenenti al gruppo delle conifere risultano suddivisi in due categorie. La componente prevalente è costituita da conifere non ulteriormente specificate, che rappresentano il 62% del totale. La restante parte, pari al 38%, è formata da elementi identificati come abete rosso.

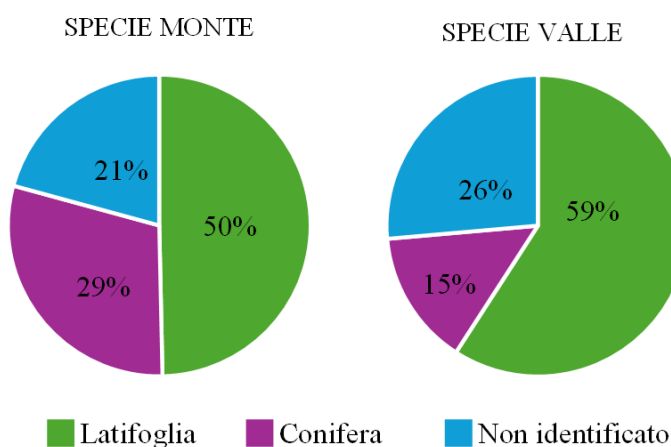


Figura 4.2 Specie degli elementi singoli

### 4.3 Presenza di rami e foglie

I quattro grafici in Figura 4.3 offrono una panoramica comparativa sulla presenza di rami e foglie negli elementi legnosi rinvenuti nei tratti di monte e di valle del Tegnás. Nei tratti montani, la presenza di rami è limitata al 31%, mentre quella di foglie è ancora più ridotta, appena al 9%. In valle, entrambe le percentuali aumentano: i rami sono presenti nel 45% degli elementi, le foglie nel 18%.

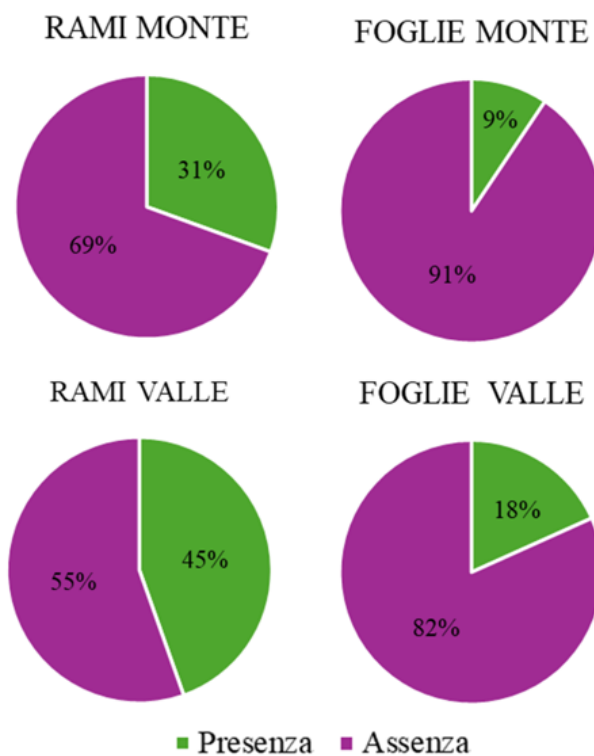


Figura 4.3 Presenza/assenza di rami/foglie negli elementi singoli

### 4.4 Posizione degli elementi all'interno dell'alveo

Nel contesto dell'analisi del legname fluviale, la posizione degli elementi all'interno dell'alveo è stata classificata secondo sei categorie morfologiche. La barra indica una zona di accumulo sedimentario all'interno del canale, mentre la barra alta rappresenta la porzione più elevata e stabile di tale deposito. La categoria barra/canale si riferisce a situazioni intermedie, in cui l'elemento si trova tra la zona di deposito e quella di scorrimento. Il canale rappresenta l'alveo attivo principale, sede del flusso idrico, mentre il canale secondario identifica rami minori o temporanei del corso d'acqua. Infine, la sponda corrisponde al margine laterale del canale, spesso soggetto a deposizione durante eventi di piena.

Il grafico a barre in Figura 4.4 mostra come la distribuzione degli elementi legnosi vari significativamente tra monte e valle. Nei tratti montani, la maggior parte degli elementi si concentra in corrispondenza della barra attiva (70,13%), canale principale (80%) e sponde (94,92%), con

percentuali elevate anche nei canali secondari e nella categoria barra/canale, entrambe esclusivamente presenti in monte; in particolare per quest'ultima categoria si considerano quelle situazioni in cui l'elemento è in parte dentro al canale e in parte sulla barra che potrebbe essere attiva o alta. In valle, invece, si osserva una netta prevalenza di elementi su barre alte (85,45%), mentre le altre posizioni risultano meno rappresentate.

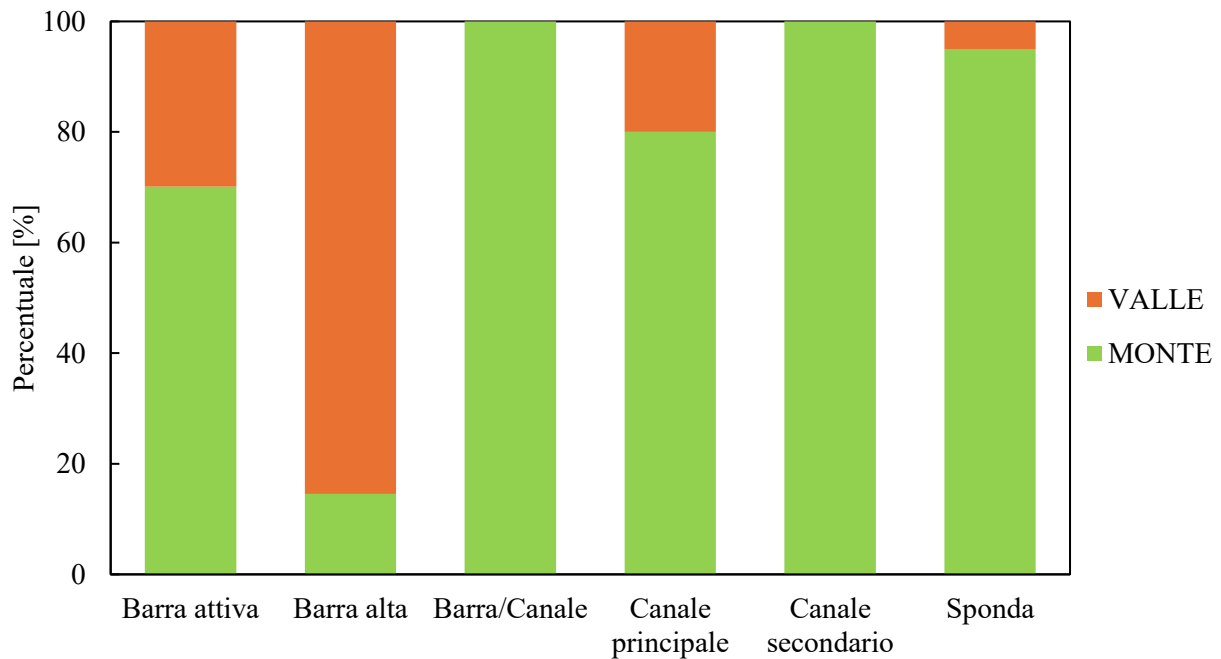


Figura 4.4 Posizione degli elementi singoli

#### 4.5 Orientamento degli elementi rispetto alla direzione del flusso

Il grafico a barre in Figura 4.5 rappresenta l'orientamento degli elementi legnosi nei tratti di monte e di valle, suddiviso in tre categorie: perpendicolare, parallelo e obliquo rispetto all'asse del canale. In tutti e tre i casi, la percentuale di elementi orientati in modo perpendicolare o obliquo è nettamente maggiore nel tratto di monte (oltre l'80%), mentre in valle le stesse categorie si attestano intorno al 18–29%.

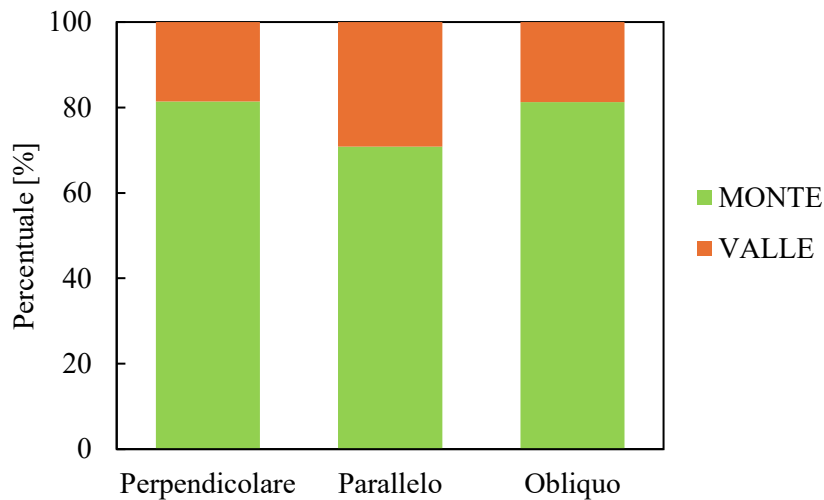


Figura 4.5 Orientamento degli elementi singoli rispetto alla direzione del flusso

## 4.6 Dimensioni degli elementi singoli

I due box plot mostrati in Figura 4.6 rappresentano la distribuzione delle dimensioni degli elementi legnosi, in particolare il diametro (in cm) e la lunghezza (in m), aggregando i dati provenienti dai tratti di monte e di valle.

Nel box plot del diametro si osserva una mediana contenuta entro valori moderati, con un intervallo interquartile relativamente compatto e la presenza di outlier significativi che raggiungono circa 65 cm. Questo indica che, pur essendo la maggior parte degli elementi di diametro medio, esistono alcuni tronchi di dimensioni molto elevate, probabilmente provenienti da schianti di alberi maturi.

Nel box plot della lunghezza, la distribuzione è più ampia: la mediana è più alta, l'intervallo interquartile più esteso e gli outlier raggiungono i 35 metri. Questo suggerisce una maggiore variabilità nella lunghezza degli elementi, con la presenza di tronchi molto lunghi che potrebbero aver mantenuto la loro integrità strutturale durante il trasporto.

Nel complesso, i dati evidenziano una forte eterogeneità dimensionale, con alcuni elementi di grandi dimensioni che potrebbero avere un ruolo rilevante nella formazione di accumuli o nell'interazione con la morfologia fluviale.

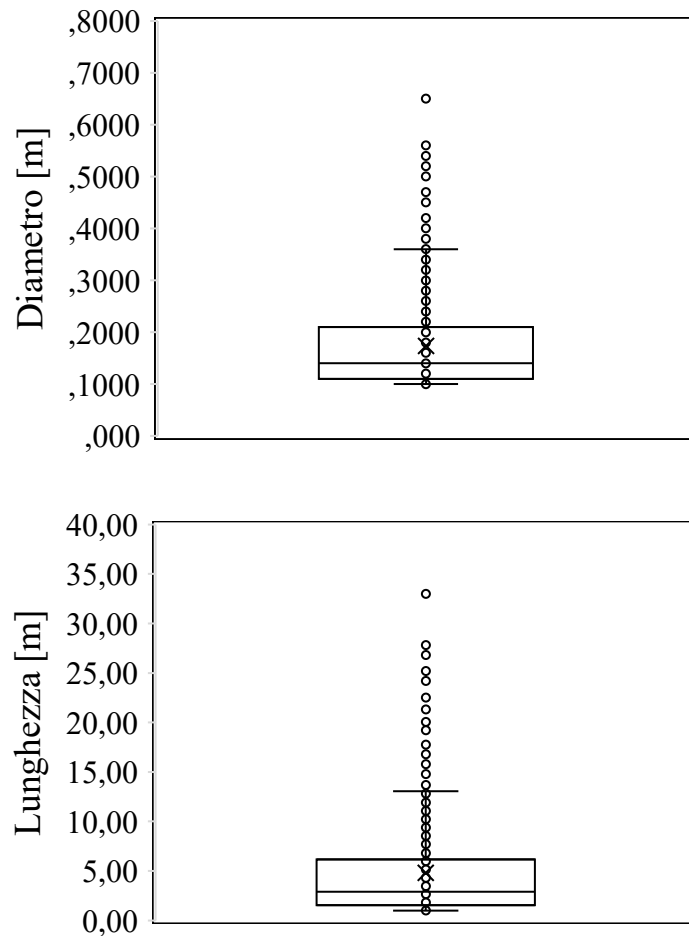
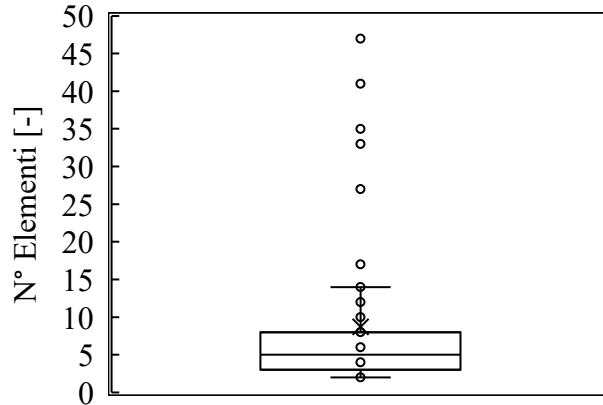


Figura 4.6 Dimensioni elementi legnosi singoli.

## 4.7 Analisi degli accumuli

Dopo aver analizzato le caratteristiche individuali degli elementi legnosi, si passa ora all'esame degli accumuli, ovvero delle aggregazioni di più elementi che si sono depositati in alveo in seguito all'evento di piena.

Il box plot relativo al numero di elementi per accumulo in Figura 4.7 mostra una distribuzione fortemente asimmetrica: la mediana è contenuta, ma sono presenti numerosi outlier che indicano accumuli con un numero di elementi significativamente superiore alla media. Questo suggerisce che, Sebbene la maggior parte degli accumuli presenti dimensioni modeste, sono stati osservati anche alcuni casi caratterizzati da volumi significativamente maggiori. Tali accumuli risultano localizzati in punti specifici del tratto analizzato.



**Figura 4.7** Numero di elementi singoli legnosi che costituiscono gli accumuli

A partire dalle dimensioni riportate nel file Excel, è stato calcolato il volume di ogni accumulo ed elemento singolo.

Successivamente è stato calcolato il volume dei vuoti è stato calcolato sottraendo al volume dell'ingombro dell'accumulo (vuoto + pieno) la somma dei volumi degli elementi singoli che costituiscono l'accumulo:

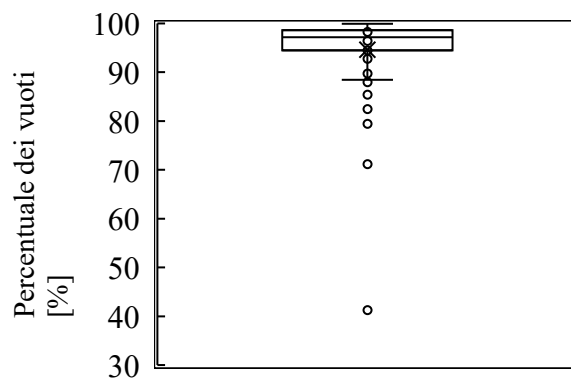
$$V_v = V_{acc} - \sum_{i=1}^N V_i$$

Dove:

- $V_v$  [m<sup>3</sup>]: volume dei vuoti;
- $V_{acc}$  [m<sup>3</sup>]: volume dell'accumulo;
- $V_i$  [m<sup>3</sup>]: volume dell'i-esimo elemento costituente l'accumulo.

Successivamente è stata calcolata la percentuale dei vuoti:

$$\%_v = 100 - \frac{V_{acc} - V_v}{V_{acc}} * 100$$



**Figura 4.8** Percentuale di vuoti negli accumuli

Il box plot in Figura 4.8 mostra la distribuzione della percentuale di vuoti all'interno degli accumuli legnosi, ovvero la frazione di spazio non occupata da materiale solido. La maggior parte degli accumuli presenta valori molto elevati, con una mediana vicina al 100%, indicando strutture poco compatte e con ampi spazi interni. Tuttavia, sono presenti alcuni outlier che scendono fino a circa il 40%, segnalando accumuli più densi e strutturalmente coesi.

## 4.8 Aree di potenziale reclutamento

La Figura 4.9 mostra la distribuzione spaziale delle aree di potenziale reclutamento individuate lungo il tratto fluviale analizzato. Le aree risultano distribuite in modo discontinuo, con una maggiore concentrazione in corrispondenza dei settori caratterizzati da maggiore dinamica morfologica, in particolare lungo le sponde esterne delle curve e nei tratti con evidenze di recente instabilità.



**Figura 4.9** Aree di reclutamento degli elementi legnosi lungo il tratto fluviale analizzato

Complessivamente sono state individuate  $n = 51$  aree di reclutamento, che rappresentano i principali potenziali contributori di materiale legnoso mobilizzabile durante eventi di piena. Dal punto di vista dimensionale, le aree mostrano una elevata variabilità in termini di superficie (Tabella 4.1), con valori compresi tra circa  $20 \text{ m}^2$  e oltre  $14000 \text{ m}^2$ . In particolare, le aree più estese (Area 22, Area 2, Area 48) costituiscono una quota significativa della superficie totale; numerose aree presentano invece dimensioni ridotte ( $< 100 \text{ m}^2$ ), indicando una frammentazione delle sorgenti di legname lungo il corso d'acqua.

**Tabella 4.1** Superficie delle aree di reclutamento

	Area [m <sup>2</sup> ]
1	14900,93
2	4731,96
3	2276,80
4	1047,87
5	379,76
6	1272,79
7	3677,24
8	1160,44
12	213,76
11	216,82
19	547,30
20	1080,43
22	7012,75
23	3834,71
24	3559,10
40	2300,90
42	3836,44
46	2061,73
47	3312,27
48	4214,78
49	1159,38
50	1468,15
51	1746,27
18	720,08
44	2288,85
45	1351,70
9	161,88
10	156,63
16	580,70
21	1962,92
25	1174,96
26	2423,45
15	1635,17
14	308,40
13	234,77
17	852,08
27	522,31
28	691,67
29	232,97
30	296,26
31	101,87
32	22,93
33	20,97
34	177,88
35	153,16
36	325,80
37	1751,41
38	1223,34
39	578,93
41	1561,88
43	114,85

La superficie complessiva delle aree individuate ammonta a circa 90000 m<sup>2</sup> fornendo una stima quantitativa del potenziale bacino di reclutamento.

Dal punto di vista spaziale, le aree si concentrano prevalentemente: lungo tratti con evidente erosione spondale; in corrispondenza di zone prive o impoverite di vegetazione ripariale; in settori con morfologie attive (canali, barre, incisioni locali) (Figura 4.10).

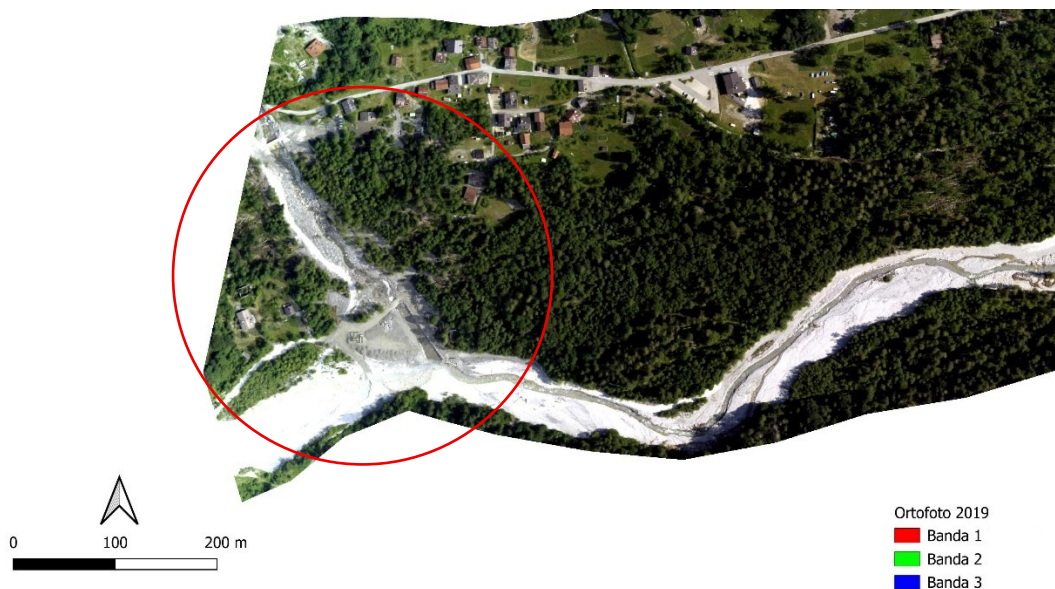


Figura 4.10 Tratto di sponda eroso

## 4.9 Risultati della simulazione numerica con ORSA2D\_WT

Di seguito sono riportati i principali risultati della simulazione numerica, con riferimento alla dinamica del flusso e al movimento degli elementi legnosi. Le rappresentazioni grafiche permettono di evidenziare le traiettorie, le aree di transito e le zone di potenziale accumulo.

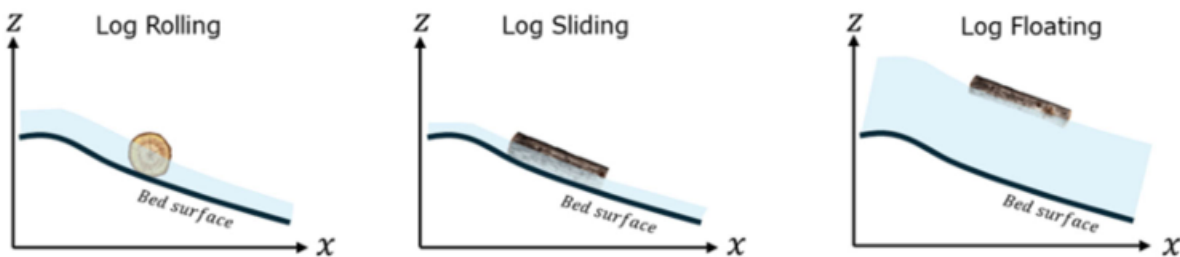
La Tabella 4.20 riporta, per ciascuno dei dieci elementi lignei simulati, un insieme di informazioni quantitative estratte dagli output del modello ORSA2D\_WT. I dati includono il tempo di inserimento dell'elemento nel dominio, la distanza totale percorsa, la velocità associate al moto dell'elemento, la velocità del flusso e la suddivisione dei tempi trascorsi nelle diverse modalità di trasporto. La tabella costituisce quindi una sintesi numerica delle principali variabili calcolate dal modello per ogni elemento. L'organizzazione dei dati consente di visualizzare in modo immediato l'insieme delle informazioni associate a ciascun elemento, mantenendo una struttura uniforme e facilmente confrontabile tra le diverse righe.

**Tabella 4.2** Risultati della simulazione numerica

Tempo di inserimento	ID elemento	Distanza percorsa [m]	V [m/s]	Vf [m/s]	Modalità di trasporto
29/10/2018 11:00	1	2960,02	2,69	2,76	Fermo (737.0 min)Galleggia (18.5 min)
	2	1295,49	2,69	2,78	Fermo (747.5 min)Galleggia (8.0 min)
	3	49,67	0,01	0,39	Fermo (733.3 min)Trasla/Rotola (22.2 min)
29/10/2018 15:40	4	489,78	1,77	2,84	Fermo (732.9 min)Trasla/Rotola (18.3 min)Galleggia (4.3 min)
	5	97,47	2,36	2,87	Fermo (754.8 min)Galleggia (0.7 min)
	6	3049,75	2,92	3,51	Fermo (735.5 min)Trasla/Rotola (2.4 min)Galleggia (17.6 min)
	7	244,95	2,35	2,60	Fermo (753.8 min)Galleggia (1.7 min)
29/10/2018 18:00	8	2053,86	5,41	5,57	Fermo (744.4 min)Trasla/Rotola (0.3 min)Galleggia (10.8 min)
	9	2259,15	3,56	3,64	Fermo (744.9 min)Galleggia (10.6 min)
	10	670,04	3,56	6,00	Fermo (750.8 min)Trasla/Rotola (1.2 min)Galleggia (3.5 min)

La tabella riassume, per ciascun elemento simulato, un insieme di parametri calcolati a partire dalle traiettorie fornite dal modello. La prima colonna riporta i tre orari di rilascio utilizzati nella simulazione, ciascuno associato a un gruppo distinto di elementi. La seconda colonna elenca gli identificativi numerici dei tronchi, da 1 a 10. La terza colonna riporta la distanza percorsa da ogni elemento, la quarta la velocità media dell'elemento, la quinta la velocità del flusso.

Infine, l'ultima colonna sintetizza le modalità di trasporto osservate per ciascun elemento, riportando in forma testuale le tre possibili condizioni (Fermo, Trasla/Rotola e Galleggia) (Figura 4.21) accompagnate dal rispettivo tempo  $T_s$  espresso in minuti. A seconda del comportamento del tronco, una riga può contenere una sola modalità oppure una combinazione di due o tre, elencate in sequenza. Nel complesso, la tabella fornisce una rappresentazione compatta e strutturata dei parametri cinematici e temporali associati a ciascun elemento, permettendo di confrontare in modo immediato le diverse dinamiche di movimento restituite dal modello.



**Figura 4.21** Tipologie di moto che può compiere l'elemento legnoso (Ennouini et al., 2025)

La Figura 4.11 mostra la traiettoria dell'elemento 1 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 11:00. La distanza totale percorsa è pari a 2960,02 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 2,69 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di galleggiamento per 18,5 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento continuo lungo l'asta principale del corso d'acqua, con un percorso che segue l'andamento del canale senza deviazioni

lateralmente marcate. L'elemento completa l'intero tratto rappresentato nella simulazione mantenendo una direzione coerente con l'asse fluviale.

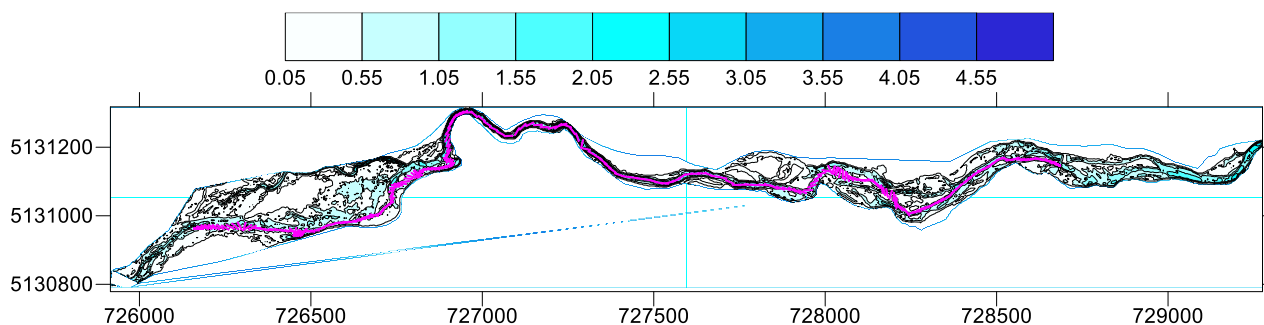


Figura 4.11 Traiettoria elemento 1

La Figura 4.12 mostra la traiettoria dell'elemento 2 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 11:00. La distanza totale percorsa è pari a 1295,49 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 2,69 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di galleggiamento per 8,0 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento che segue l'asta principale del corso d'acqua, con un percorso continuo orientato lungo il canale. L'elemento avanza lungo il tratto modellato senza deviazioni laterali rilevanti e mantiene una direzione coerente con l'andamento del corso fluviale.

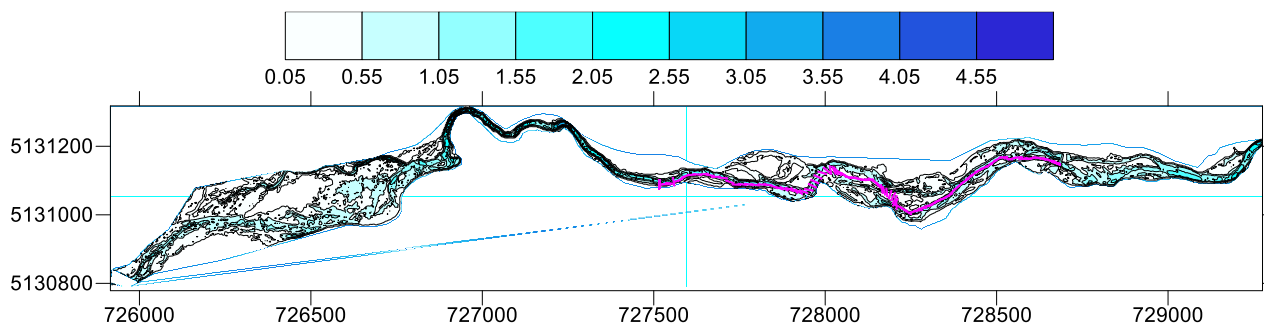


Figura 4.12 Traiettoria elemento 2

La Figura 4.13 mostra la traiettoria dell'elemento 3 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 11:00. La distanza totale percorsa è pari a 49,67 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 0,01 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di traslazione/rotolamento per 22,2 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento limitato, concentrato nella porzione iniziale del tratto modellato, con un percorso breve che si sviluppa lungo il canale senza deviazioni laterali evidenti. L'elemento non percorre l'intero tratto rappresentato nella

simulazione e si arresta dopo un avanzamento ridotto rispetto agli altri elementi inseriti nello stesso orario.

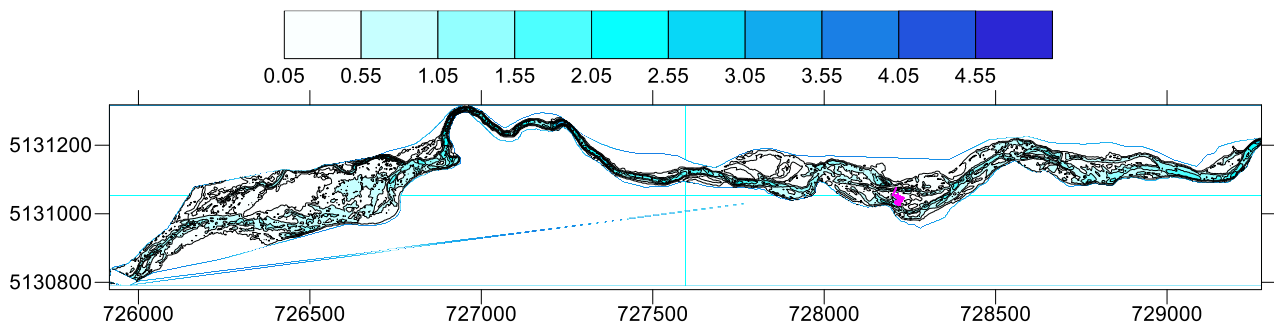


Figura 4.13 Traiettoria elemento 3

La Figura 4.14 mostra la traiettoria dell'elemento 4 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 11:00. La distanza totale percorsa è pari a 489,78 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 1,77 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di traslazione/rotolamento per 18,3 minuti e di galleggiamento per 4,3 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento che si sviluppa lungo il canale principale, con un percorso continuo orientato secondo l'asse fluviale. L'avanzamento è limitato alla porzione finale del tratto modellato e non presenta deviazioni laterali rilevanti. L'elemento esce dal dominio simulato.

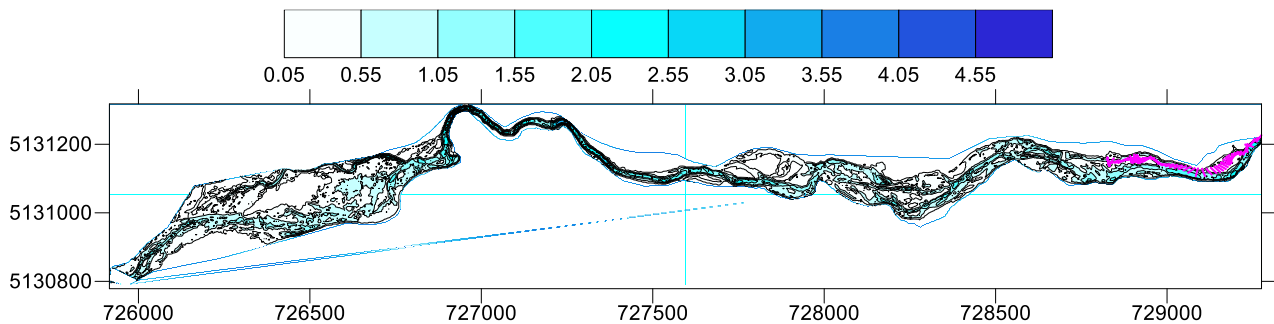
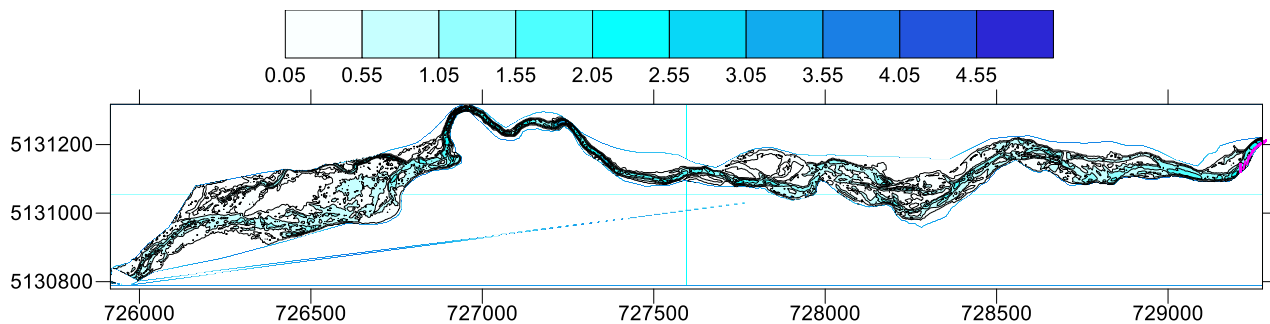


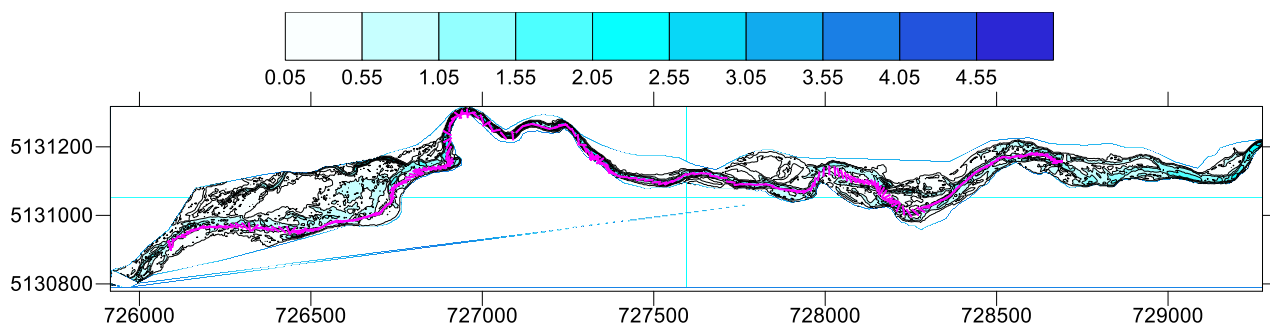
Figura 4.14 Traiettoria elemento 4

La Figura 4.15 mostra la traiettoria dell'elemento 5 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 15:40. La distanza totale percorsa è pari a 97,47 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 2,36 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di galleggiamento per 0,7 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento limitato, concentrato nella parte finale del tratto modellato, con un percorso breve. L'elemento si arresta dopo un avanzamento ridotto.



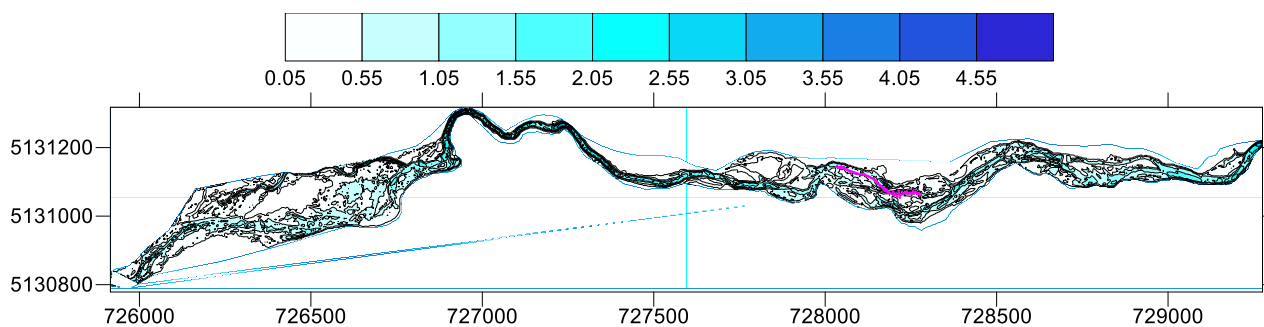
**Figura 4.15** Traiettorie elemento 5

La Figura 4.16 mostra la traiettoria dell'elemento 6 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 15:40. La distanza totale percorsa è pari a 3049,75 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 2,92 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di traslazione/rotolamento per 2,4 minuti e di galleggiamento per 17,6 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento continuo lungo l'asta principale del corso d'acqua, con un percorso che segue l'andamento del canale per l'intera estensione del dominio modellato. L'elemento avanza senza deviazioni laterali rilevanti e si arresta in corrispondenza di un ostacolo rappresentato da un ponte presente nel tratto analizzato.



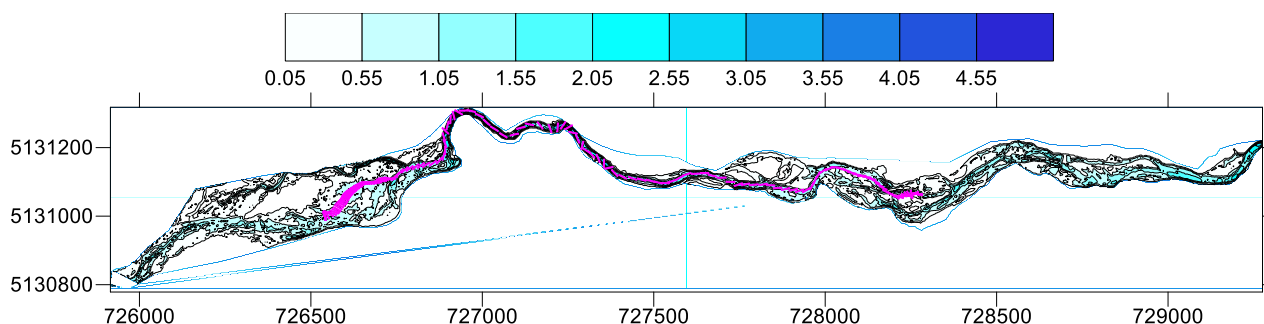
**Figura 4.16** Traiettorie elemento 6

La Figura 4.17 mostra la traiettoria dell'elemento 7 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 15:40. La distanza totale percorsa è pari a 244,95 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 3,25 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di galleggiamento per 1,7 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento concentrato nella parte centrale del tratto modellato. L'elemento si arresta dopo un avanzamento limitato.



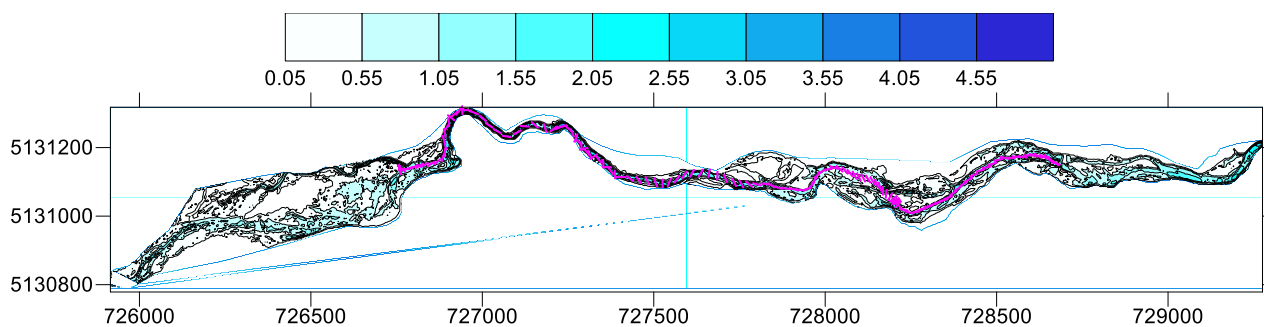
**Figura 4.17** Traiettoria elemento 7

La Figura 4.18 mostra la traiettoria dell'elemento 8 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 18:00. La distanza totale percorsa è pari a 2053,86 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 5,41 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di traslazione/rotolamento per 0,3 minuti e di galleggiamento per 10,8 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento continuo lungo l'asta principale del corso d'acqua, con un percorso che segue l'andamento del canale per gran parte del dominio modellato. L'elemento avanza senza deviazioni laterali rilevanti e si arresta nello stesso punto dell'elemento 7.



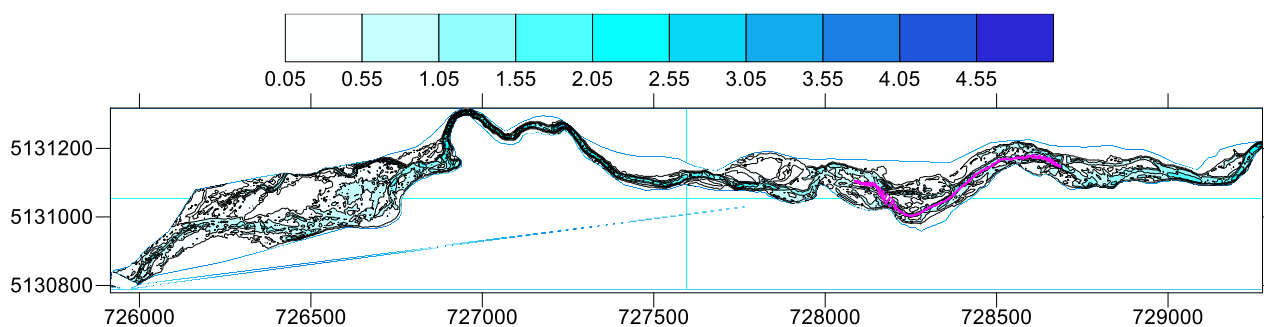
**Figura 4.18** Traiettoria elemento 8

La Figura 4.19 mostra la traiettoria dell'elemento 9 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 18:00. La distanza totale percorsa è pari a 2259,15 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 3,56 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di galleggiamento per 10,6 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento continuo lungo l'asta principale del corso d'acqua, con un percorso che segue l'andamento del canale per gran parte del dominio modellato. L'elemento avanza senza deviazioni rilevanti e percorre una porzione estesa del tratto simulato, infine si arresta in corrispondenza dell'ostacolo costituito dal ponte come l'elemento 6.



**Figura 4.19** Traiettoria elemento 9

La Figura 4.20 mostra la traiettoria dell'elemento 10 che viene inserito in simulazione il 29/10/2018 alle 18:00. La distanza totale percorsa è pari a 670,04 m, mentre la velocità media registrata durante il movimento è 3,56 m/s. Per quanto riguarda le modalità di trasporto, l'elemento rimane in stato di traslazione/rotolamento per 1,2 minuti e di galleggiamento per 3,5 minuti. La traiettoria mostra uno spostamento concentrato nella parte finale del tratto modellato. L'elemento si arresta dopo un avanzamento limitato come gli elementi 6 e 9.



**Figura 4.20** Traiettoria elemento 10

La Tabella 4.20 riporta, per ciascuno dei dieci elementi lignei simulati, un insieme di informazioni quantitative estratte dagli output del modello ORSA2D\_WT. I dati includono il tempo di inserimento dell'elemento nel dominio, la distanza totale percorsa, la velocità associate al moto dell'elemento, la velocità del flusso e la suddivisione dei tempi trascorsi nelle diverse modalità di trasporto. La tabella costituisce quindi una sintesi numerica delle principali variabili calcolate dal modello per ogni elemento. L'organizzazione dei dati consente di visualizzare in modo immediato l'insieme delle informazioni associate a ciascun elemento, mantenendo una struttura uniforme e facilmente confrontabile tra le diverse righe.

## CAPITOLO 5 – DISCUSSIONI

Il presente capitolo discute criticamente i risultati ottenuti, mettendo in relazione le evidenze emerse dai rilievi di campo, dalle analisi GIS e dalla modellazione numerica con i principali processi che controllano il reclutamento, il trasporto e la deposizione del materiale legnoso nei torrenti montani. L'obiettivo è verificare in che misura i pattern osservati nel torrente Tognas durante la Tempesta Vaia risultino coerenti con i modelli concettuali disponibili in letteratura, evidenziando al contempo gli aspetti specifici del caso di studio, i limiti dell'approccio adottato e le sue possibili implicazioni applicative.

### 5.1 Interpretazione complessiva delle caratteristiche del legname

L'analisi congiunta dello stato di conservazione, della composizione specifica e della presenza di rami e foglie negli elementi legnosi rinvenuti nel torrente Tognas dopo la Tempesta Vaia restituisce un quadro coerente con i processi di reclutamento, trasporto e degradazione tipici dei sistemi montani soggetti a eventi estremi. Nel passaggio dal settore di monte a quello di valle si osserva infatti una progressiva selezione degli elementi più robusti e strutturalmente integri: aumenta la percentuale di legname maturo, mentre diminuiscono gli elementi giovani e marcescenti. Questo andamento è coerente con quanto riportato da Andreoli et al. (2007), Gurnell et al. (2002) e Wohl (2013), secondo cui gli elementi più degradati tendono a frammentarsi o a essere trattenuti nei tratti superiori del canale, mentre quelli più resistenti mantengono più facilmente la propria integrità durante il trasporto. Anche la distribuzione delle specie arboree conferma questa tendenza. La prevalenza delle latifoglie in entrambi i settori, più marcata verso valle, riflette verosimilmente sia la composizione della vegetazione riparia sia la maggiore connessione morfologica di queste specie con il canale, come osservato da Gurnell et al. (2002) e Ruiz-Villanueva et al. (2016). La diminuzione delle conifere verso valle può invece essere interpretata come effetto combinato degli schianti indotti da Vaia, che hanno colpito in modo particolarmente severo *Picea abies* (Chirici et al., 2019), e della minore probabilità che elementi provenienti da quote più elevate raggiungano i tratti distali in un sistema fortemente inciso (Wohl, 2013). La presenza di numerosi elementi non identificati è inoltre compatibile con i processi di abrasione e perdita dei caratteri morfologici dovuti al trasporto in condizioni di elevata energia. Anche la distribuzione di rami e foglie contribuisce a definire il quadro interpretativo. La scarsa presenza di foglie in entrambi i settori, soprattutto nel tratto di monte, suggerisce che molti elementi non siano stati reclutati immediatamente prima della piena oppure abbiano subito una rapida degradazione nelle fasi iniziali dell'evento, come descritto da Wohl (2013). La maggiore presenza di rami nel tratto di valle può invece riflettere sia la mobilitazione diretta durante l'evento sia la

maggior probabilità che elementi ramificati vengano intercettati e trattenuti in zone a minore energia, come barre laterali o tratti più ampi del canale (Gurnell et al., 2002). Al contrario, la prevalenza di elementi privi di rami nel tratto di monte è coerente con un ambiente più confinato e dinamico, dove urti ripetuti contro pareti e massi favoriscono la frammentazione (Ruiz-Villanueva et al., 2016).

Nel complesso, i risultati indicano che la Tempesta Vaia ha attivato nel Tegnás processi di reclutamento e trasporto fortemente selettivi, capaci di favorire progressivamente la sopravvivenza e la migrazione degli elementi più resistenti e strutturalmente integri. La distribuzione osservata lungo l'asta fluviale risulta quindi coerente con i modelli concettuali della dinamica del legname nei torrenti montani e conferma il ruolo determinante della connessione morfologica, dell'energia del flusso e dei processi di degradazione nel controllare la composizione del materiale legnoso.

## **5.2 Ruolo della posizione e della morfologia nella distribuzione degli elementi**

La distribuzione spaziale e l'orientazione degli elementi legnosi nel torrente Tegnás evidenziano il ruolo determinante della morfologia del canale nel controllo dei processi di trasporto e deposizione. La forte concentrazione di elementi nel tratto di monte, osservata in quasi tutte le categorie morfologiche, riflette un ambiente più confinato e caratterizzato da marcate discontinuità geometriche, dove massi, restringimenti e variazioni di pendenza favoriscono la ritenzione precoce del legname. Le categorie Barra/Canale e Canale secondario risultano costituite esclusivamente da elementi provenienti dal settore di monte, indicando che il materiale mobilizzato nelle fasi iniziali dell'evento viene rapidamente intercettato dalle prime opportunità di ritenzione. Questo comportamento è coerente con quanto riportato in letteratura per i torrenti montani ad alta energia, dove la ridotta profondità del flusso e la complessità morfologica limitano fortemente la mobilità del legname (Gurnell et al., 2002; Wohl, 2013; Kramer & Wohl, 2017). Gli elementi che raggiungono il tratto di valle rappresentano quindi una frazione selezionata, costituita da tronchi che hanno superato le principali zone di ritenzione a monte grazie a caratteristiche dimensionali o strutturali favorevoli alla mobilità. Nel tratto di valle, la maggiore presenza di elementi nella categoria Barra alta suggerisce che la diminuzione dell'energia specifica e una morfologia meno incisa favoriscano il deposito su superfici sopraelevate durante le fasi di piena. Questo pattern è coerente con quanto osservato nei tratti di transizione tra ambienti montani e pedemontani, dove le barre alte rappresentano siti preferenziali di accumulo per il legname trasportato durante eventi estremi (Ruiz-Villanueva et al., 2016). L'orientazione degli elementi rispetto al flusso conferma ulteriormente il controllo esercitato dalla morfologia. Nel tratto di monte prevalgono orientazioni perpendicolari e oblique, tipiche di

contesti ad alta energia in cui il legname viene intercettato da ostacoli o trattenuto in zone turbolente, dove la componente trasversale della corrente è significativa (Wohl, 2013). La presenza di elementi paralleli al flusso, seppur meno frequente, indica che una parte del materiale ha sperimentato fasi di trasporto relativamente lineare prima della deposizione (Gurnell et al., 2002). Nel tratto di valle, la minore presenza complessiva di elementi riflette la selezione operata a monte, mentre le orientazioni risultano più variabili e meno rigidamente controllate dalla morfologia locale (Kramer & Wohl, 2017). Nel complesso, i risultati indicano che la morfologia del canale non rappresenta soltanto il contesto entro cui avviene il trasporto del legname, ma agisce come un fattore attivo di selezione, intercettazione e organizzazione spaziale degli elementi lungo l'asta fluviale. Il tratto di monte, più confinato e irregolare, trattiene la maggior parte del materiale e ne condiziona fortemente la disposizione, mentre solo una frazione limitata riesce a raggiungere la valle, dove si deposita preferenzialmente in corrispondenza di zone a minore energia.

### **5.3 Implicazioni geomorfologiche delle dimensioni degli elementi**

L'analisi delle dimensioni degli elementi legnosi rinvenuti nel Tegnias dopo la Tempesta Vaia evidenzia un insieme eterogeneo, caratterizzato da diametri prevalentemente contenuti e lunghezze molto variabili. I box plot mostrano una distribuzione dei diametri concentrata nella fascia medio-bassa, con pochi outlier fino a circa 0.70 m, mentre le lunghezze presentano una dispersione più ampia, con valori che superano i 30 m. Questo quadro riflette la combinazione di processi di reclutamento, frammentazione e trasporto attivati durante l'evento, che ha mobilitato sia materiale già degradato sia tronchi interi provenienti da schianti recenti. Il diametro rappresenta un controllo importante sulla mobilità del legname nei torrenti montani. Studi condotti in canali ad alta pendenza evidenziano come la struttura step-pool e l'elevata resistenza idraulica favoriscano la ritenzione degli elementi più grossi, mentre quelli con diametri minori risultano più facilmente mobilizzabili anche a portate moderate (Comiti et al., 2007). La prevalenza di diametri medio-bassi nel Tegnias suggerisce quindi una selezione verso elementi più leggeri o già parzialmente degradati, coerentemente con un trasporto ad alta energia ma fortemente condizionato dalla morfologia incisa del canale. La lunghezza mostra invece una variabilità molto maggiore, indicando la coesistenza di diversi meccanismi di reclutamento: caduta diretta in alveo, trasporto da versante, mobilitazione di accumuli preesistenti e rielaborazione di materiale già frammentato. Gli elementi più lunghi richiedono condizioni idrauliche più intense per essere mobilizzati e tendono a depositarsi in corrispondenza di discontinuità morfologiche o restringimenti, mentre quelli più corti possono essere trasportati più a lungo e raggiungere anche i tratti distali del canale (Benda & Sias, 2003). La presenza di outlier molto lunghi è coerente con la mobilitazione di tronchi interi durante le fasi di massima portata dell'evento. Le

osservazioni nel bacino sperimentale del Rio Cordon confermano che, in condizioni di piena estrema, si sviluppa una selezione dimensionale marcata, con maggiore mobilità per gli elementi più piccoli e maggiore ritenzione per quelli più grandi (Mao et al., 2010). Tuttavia, nel caso del Tegnás, i risultati suggeriscono che gli effetti delle dimensioni non possano essere interpretati in modo isolato, ma debbano essere letti in relazione alla posizione iniziale degli elementi e alla configurazione morfologica del canale. In questo senso, la mobilità del legname appare controllata da una combinazione di fattori geometrici e contestuali, più che da una semplice relazione univoca tra dimensioni e trasportabilità. Nel complesso, il quadro osservato indica che la piena di Vaia ha mobilitato una gamma ampia di materiali, ma con una selezione preferenziale verso elementi più sottili e con lunghezze variabili, in accordo con i modelli concettuali della dinamica del legname nei sistemi montani.

#### **5.4 Funzione e formazione degli accumuli legnosi**

L'analisi degli accumuli legnosi formati nel torrente Tegnás dopo la Tempesta Vaia evidenzia una marcata variabilità sia nel numero di elementi costituenti sia nella loro porosità, riflettendo la complessità dei processi di intrappolamento e deposizione nei sistemi montani ad alta energia. La maggior parte degli accumuli è costituita da pochi tronchi, mentre alcuni casi isolati presentano un numero molto elevato di elementi, configurandosi come outlier. Questo suggerisce che la piena abbia generato sia piccoli accumuli diffusi, sia strutture più complesse, probabilmente in corrispondenza di specifici punti di intrappolamento morfologico. La formazione degli accumuli è infatti fortemente controllata dalla disponibilità di materiale, dalla morfologia del canale e dalla presenza di elementi chiave che fungono da nucleo di innesco, come massi di grandi dimensioni o tronchi lunghi disposti trasversalmente (Abbe & Montgomery, 1996). La percentuale di vuoti all'interno degli accumuli evidenzia ulteriormente la variabilità strutturale del materiale depositato. La maggior parte delle strutture presenta porosità elevate, superiori al 90%, tipiche di configurazioni relativamente aperte e dinamiche, formate da elementi sottili o disposti in modo disordinato. Alcuni accumuli mostrano invece porosità più basse, fino a circa il 40%, indicando una maggiore compattazione e stabilità del materiale. Accumuli più compatti sono generalmente associati alla presenza di tronchi lunghi o a condizioni idrauliche che favoriscono l'incastro e la stabilizzazione degli elementi, rendendoli meno suscettibili alla rimobilizzazione durante eventi successivi. Al contrario, strutture ad alta porosità tendono a essere più instabili e facilmente riorganizzabili (Gurnell et al., 2002). Le osservazioni nel bacino del Rio Cordon confermano che, in condizioni di piena estrema, la morfologia step-pool e la presenza di elementi di grandi dimensioni favoriscono la formazione di accumuli stabili, capaci di trattenere ulteriore materiale e modificare localmente il campo di moto (Mao et al., 2010).

Oltre a rappresentare il risultato dei processi di trasporto e intrappolamento, gli accumuli svolgono un ruolo geomorfologico attivo, influenzando la distribuzione delle velocità, la capacità di trasporto e la traiettoria degli elementi successivamente mobilizzati. Nel caso del Tegnas, l'elevata porosità osservata in molti accumuli suggerisce strutture ancora relativamente "aperte", verosimilmente recenti e potenzialmente soggette a ulteriore rimaneggiamento. Nel complesso, la variabilità osservata riflette un sistema in cui la piena di Vaia ha attivato processi di intrappolamento selettivi, generando accumuli con caratteristiche molto diverse in termini di dimensioni, porosità e stabilità. Queste strutture contribuiscono in modo significativo alla riorganizzazione morfologica del canale e alla distribuzione del materiale legnoso lungo l'asta fluviale, in accordo con i modelli concettuali della dinamica del legname nei sistemi montani.

## **5.5 Discussione dei risultati della simulazione numerica**

La simulazione numerica condotta con ORSA2D\_WT evidenzia una dinamica del legname fortemente controllata dalla posizione iniziale degli elementi e dalla morfologia locale, più che dalle loro dimensioni. Il confronto tra lunghezze reali e distanze percorse mostra infatti l'assenza di una relazione monotona tra dimensione e mobilità: elementi relativamente corti (ID 1, 3.5 m) e più lunghi (ID 6, 7 m; ID 9, 10.5 m) hanno percorso distanze elevate, mentre altri di dimensioni intermedie (ID 3, 5 m; ID 5, 6.5 m) si sono arrestati rapidamente. Questo risultato suggerisce che, nel caso del Tegnas, la lunghezza non rappresenti il principale fattore di controllo sulla mobilità, in parziale contrasto con quanto riportato da Comiti et al. (2007) per canali ad alta pendenza. Al contrario, la posizione iniziale emerge come fattore determinante. Gli elementi rilasciati nel canale attivo (ID 1, 4, 10) mostrano una mobilità medio-alta, mentre quelli collocati su sponda o in aree marginali (ID 2, 5, 7) percorrono distanze molto ridotte. Questo comportamento è coerente con quanto osservato da Ravazzolo et al. (2015), secondo cui gli elementi immessi in prossimità del talweg presentano una probabilità di trasporto significativamente maggiore rispetto a quelli situati in zone a bassa energia. La simulazione evidenzia inoltre la presenza di aree di ritenzione morfologica. Gli elementi 3, 4, 5 e 7 si arrestano in corrispondenza di depressioni locali, barre laterali o zone di riflusso, in accordo con i meccanismi descritti da Abbe & Montgomery (2003) e Collins et al. (2012). Gli elementi più mobili (ID 8, 9 e 10) mostrano invece un rallentamento marcato nel tratto sinuoso centrale, suggerendo che la curvatura del canale agisca come zona di accumulo preferenziale, come riportato da Piégay & Gurnell (1997) e Wohl (2020). Le velocità degli elementi risultano sistematicamente inferiori a quelle del flusso, confermando quanto documentato da Persi et al. (2019) e Kang et al. (2021): l'interazione con il fondo, la forma irregolare dei tronchi e la presenza di ostacoli determinano un moto intermittente e

rallentato rispetto alla corrente. In questo senso, la simulazione non si limita a riprodurre traiettorie plausibili, ma consente di evidenziare i principali controlli fisici della mobilità del legname nel tratto studiato. Nonostante le semplificazioni del modello (elementi rigidi, assenza di interazioni multiple e mancata rappresentazione della vegetazione riparia) i risultati riproducono in modo credibile le principali dinamiche osservate sul campo, in accordo con quanto discusso da Mazzorana et al. (2009) e Ruiz-Villanueva et al. (2014). Va tuttavia sottolineato che il buon accordo qualitativo tra simulazioni ed evidenze di campo non rappresenta una validazione completa del modello, ma indica piuttosto la sua capacità di cogliere in modo realistico i meccanismi dominanti di mobilitazione, rallentamento e arresto degli elementi.

## **5.6 Limiti del lavoro e sviluppi futuri**

Nonostante la coerenza e la solidità dei risultati ottenuti, il lavoro presenta alcuni limiti che è importante riconoscere per una corretta interpretazione delle conclusioni e per orientare gli sviluppi futuri. Tali limiti riguardano sia la disponibilità e qualità dei dati, sia le semplificazioni adottate nella modellazione numerica.

Limiti legati ai dati: Il principale limite riguarda l'assenza di informazioni immediatamente pre-evento sugli elementi legnosi presenti in alveo. La mancanza di rilievi antecedenti alla Tempesta Vaia non consente di quantificare con precisione la quantità e la distribuzione del legname prima della piena, rendendo difficile distinguere tra materiale mobilizzato e nuovo apporto da versante. Questa criticità, comune negli studi post-evento, evidenzia l'importanza di campagne di monitoraggio sistematiche per una caratterizzazione completa del sistema fluviale. Un'ulteriore fonte di incertezza è legata all'identificazione delle aree di reclutamento tramite confronto tra ortofoto pre- e post-evento. Sebbene questa procedura permetta di individuare in modo efficace le zone potenzialmente coinvolte, non consente di associare in modo univoco i singoli elementi rinvenuti in alveo alle specifiche aree sorgente. Infine, l'analisi si basa su un dataset dettagliato ma limitato al rilievo post-evento, che restituisce una fotografia statica del sistema e non permette di osservare direttamente le fasi dinamiche di mobilitazione e trasporto durante la piena.

Limiti legati alla modellazione numerica: Per quanto riguarda la simulazione, un primo limite è rappresentato dalla scelta di modellare esclusivamente la fase di picco dell'evento. Questa impostazione consente di analizzare le condizioni più critiche, ma non permette di valutare i processi che avvengono durante le fasi di crescita e recessione della piena, che possono influenzare significativamente la mobilità e i tempi di deposito del legname. Un secondo aspetto riguarda la rappresentazione semplificata degli elementi legnosi come corpi rigidi, privi di deformabilità. Tale schematizzazione non consente di simulare fenomeni complessi come l'incastro tra tronchi, la

formazione dinamica degli accumuli o le interazioni con la vegetazione riparia, introducendo una fonte di incertezza nella rappresentazione dei processi reali. Inoltre, la simulazione è stata condotta su un numero limitato di elementi rappresentativi, scelta metodologicamente giustificata ma che non permette di descrivere l'intera variabilità del materiale effettivamente mobilizzato durante l'evento. Nel complesso, questi limiti non compromettono la validità generale del lavoro, ma evidenziano la complessità intrinseca della dinamica del legname nei torrenti montani e la necessità di approcci sempre più integrati e dettagliati.

Gli sviluppi futuri di questo lavoro possono muoversi lungo diverse direzioni, tutte finalizzate a migliorare la comprensione e la capacità predittiva della dinamica del materiale legnoso. Un primo passo consiste nell'estendere la simulazione all'intero idrogramma dell'evento, includendo le fasi di crescita e recessione della piena, così da cogliere eventuali mobilizzazioni tardive, processi di rilascio dagli accumuli e fenomeni di deposito temporaneo. Un secondo ambito di sviluppo riguarda l'adozione di modelli più avanzati, in grado di rappresentare le interazioni tra il legname e la vegetazione riparia. L'inclusione di tali processi permetterebbe di simulare in modo più realistico la formazione e l'evoluzione degli accumuli, nonché il loro effetto sulla dinamica idraulica. Ulteriori miglioramenti potrebbero derivare dall'integrazione di dati ad alta risoluzione, come rilievi LiDAR o fotogrammetrici, utili per una rappresentazione più accurata e con maggiore dettaglio della morfologia del canale e degli ostacoli presenti in alveo. Infine, un'importante direzione di ricerca riguarda l'estensione dell'analisi alla scala di bacino. L'integrazione di modelli di reclutamento da versante permetterebbe di rappresentare in modo più realistico l'ingresso del legname nel sistema fluviale, includendo processi come la caduta di alberi, il trasporto gravitativo e il contributo da frane superficiali. Parallelamente, l'analisi della connettività longitudinale consentirebbe di individuare le zone di ritenzione, trasferimento e rilascio del legname, offrendo una visione più completa del ciclo del materiale all'interno del sistema fluviale e migliorando le valutazioni di rischio su scala territoriale.

## CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato la dinamica del materiale legnoso nel torrente Tegnias durante la Tempesta Vaia, combinando rilievi di campo, analisi GIS e modellazione numerica. Questo approccio ha permesso di ricostruire in modo coerente i processi di reclutamento, trasporto e deposizione del legname in un sistema montano fortemente perturbato.

L'analisi del database ha evidenziato una marcata eterogeneità nelle caratteristiche degli elementi legnosi e una chiara differenziazione tra il tratto di monte e quello di valle. La distribuzione dello stato di conservazione, delle specie arboree, della presenza di rami e foglie e delle dimensioni riflette un processo selettivo legato al trasporto fluviale: gli elementi più robusti e strutturalmente integri risultano maggiormente rappresentati nel tratto distale, mentre quelli più degradati o di dimensioni ridotte tendono a essere trattenuti o frammentati nei tratti superiori. Questo comportamento conferma il ruolo della morfologia incisa e dell'elevata energia specifica nel determinare una selezione progressiva del materiale lungo l'asta fluviale.

L'analisi spaziale ha evidenziato una forte connessione tra aree di reclutamento e dinamica fluviale, mostrando come gli schianti forestali e le instabilità di versante indotte dalla Tempesta Vaia abbiano rappresentato una fonte significativa di materiale legnoso. La distribuzione degli elementi lungo il canale riflette tale connessione, con una prevalenza di depositi nelle zone più dinamiche del tratto montano e una maggiore presenza di elementi su barre elevate nel tratto di valle.

La simulazione numerica ha fornito una rappresentazione dinamica del comportamento del legname durante la piena, evidenziando una mobilità fortemente selettiva. I risultati mostrano che la posizione iniziale e la morfologia locale rappresentano i principali fattori di controllo, mentre le dimensioni degli elementi, pur rilevanti, non determinano da sole la mobilità. Gli elementi rilasciati nel canale attivo presentano una maggiore probabilità di trasporto, mentre quelli situati in aree marginali tendono a essere rapidamente intercettati in zone di bassa energia o in corrispondenza di discontinuità morfologiche. Le traiettorie simulate risultano coerenti con le osservazioni di campo, confermando la capacità del modello di rappresentare i principali meccanismi fisici del trasporto del legname.

Nel complesso, i risultati evidenziano come la Tempesta Vaia abbia attivato nel Tegnias un sistema altamente selettivo, in cui la combinazione tra disponibilità di materiale, condizioni idrauliche estreme e configurazione morfologica del canale controlla in modo determinante la mobilità e la distribuzione del legname. Dal punto di vista applicativo, il lavoro conferma che l'integrazione tra dati di campo, analisi spaziale e modellazione numerica rappresenta uno strumento efficace per l'analisi della dinamica del materiale legnoso e per la valutazione del rischio idraulico nei contesti montani. Questo approccio consente non solo di interpretare eventi estremi, ma anche di supportare

la pianificazione di interventi mirati e la gestione del territorio. In prospettiva, l'estensione dell'analisi alla scala di bacino e l'utilizzo di modelli più avanzati, in grado di rappresentare le interazioni tra elementi legnosi e tra legname e vegetazione, potranno migliorare ulteriormente la capacità di prevedere e gestire la dinamica del materiale legnoso in condizioni estreme.

## BIBLIOGRAFIA

- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (1996). *Large woody debris jams, channel hydraulics, and habitat formation in large rivers*.
- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (2003). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51(1–3), 81–107. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00326-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00326-4)
- Andreoli, A., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2007a). Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1675–1692. <https://doi.org/10.1002/esp.1593>
- Andreoli, A., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2007b). Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1675–1692. <https://doi.org/10.1002/esp.1593>
- APAT – Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i Servizi Tecnici. (2004). *Carta della Natura e biodiversità nelle aree naturali protette: il Parco Nazionale Dolomiti Bellunesi*.
- ARPAV – Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. (2015). *Clima del Veneto 1994–2014: Analisi delle precipitazioni e delle temperature*.
- Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali. (2021). *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni – Secondo Ciclo di Pianificazione*.
- Benda, L. E., & Sias, J. C. (2003). A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *Forest Ecology and Management*, 172(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00576-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00576-X)
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014a). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014b). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- 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., ... Marchetti, M. (2019). Forest damage inventory after the “Vaia” storm in Italy. *Forest@ - Rivista Di Selvicoltura Ed Ecologia Forestale*, 16(1), 3–9. <https://doi.org/10.3832/efor3070-016>

- Collins, B. D., Montgomery, D. R., Fetherston, K. L., & Abbe, T. B. (2012). The floodplain large-wood cycle hypothesis: A mechanism for the physical and biotic structuring of temperate forested alluvial valleys in the North Pacific coastal ecoregion. *Geomorphology*, *139–140*, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.011>
- Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E. E., & Lenzi, M. A. (2007). Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, *340(1–2)*, 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.021>
- Ennouini, W., Persi, E., Petaccia, G., Ravazzolo, D., Picco, L., Mao, L., & Sibilla, S. (2025). Exploiting GPS and RFID field data to validate numerical modelling of large wood transport in the Tagliamento River (Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, *50(12)*. <https://doi.org/10.1002/esp.70163>
- Gurnell, A. M., Bertoldi, W., & Corenblit, D. (2012). Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, *111(1–2)*, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.005>
- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, *47(4)*, 601–619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- Kang, T., Kimura, I., & Onda, S. (2021). Application of computational modeling for large wood dynamics with collisions on moveable channel beds. *Advances in Water Resources*, *152*, 103912. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103912>
- Kramer, N., & Wohl, E. (2017). Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology*, *279*, 74–97. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.026>
- Mao, L., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2010). *Bedload dynamics in steep mountain rivers: insights from the Rio Cordon Experimental Station (Italian Alps)*.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010a). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, *394(1–2)*, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010b). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, *394(1–2)*, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>

- Martin, D. J., & Benda, L. E. (2001). Patterns of Instream Wood Recruitment and Transport at the Watershed Scale. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130(5), 940–958. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130<0940:POIWRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130<0940:POIWRA>2.0.CO;2)
- Mazzorana, B., Hübl, J., Zischg, A., & Largiader, A. (2011). Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Natural Hazards*, 56(2), 425–449. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9492-y>
- Mazzorana, B., Zischg, A., Largiader, A., & Hübl, J. (2009). Hazard index maps for woody material recruitment and transport in alpine catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(1), 197–209. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-197-2009>
- Pecorari, E., Comiti, F., Rigon, E., Picco, L., & Lenzi, M. A. (2007). Caratteristiche e quantificazione del legname in alveo in corsi d'acqua di grandi dimensioni: risultati preliminari per il fiume Piave (Belluno) . *Quaderni Di Idronomia Montana*.
- Persi, E., Petaccia, G., Sibilla, S., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2019). Calibration of a dynamic Eulerian-lagrangian model for the computation of wood cylinders transport in shallow water flow. *Journal of Hydroinformatics*, 21(1), 164–179. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.085>
- Picco, L., Sitzia, T., Mao, L., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2016). Linking riparian woody communities and fluviomorphological characteristics in a regulated gravel-bed river (Piave River, Northern Italy). *Ecohydrology*, 9(1), 101–112. <https://doi.org/10.1002/eco.1616>
- Piégay, H. (2003). Dynamics of wood in large rivers. In S. V. Gregory, T. A. B. Boyle, & J. A. Winters (Eds.), *The Ecology and Management of Wood in World Rivers* (pp. 109–133). American Fisheries Society.
- Piégay, H., & Gurnell, A. M. (1997). Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from S.E. France and S. England. *Geomorphology*, 19(1–2), 99–116. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00045-1)
- Provincia di Alessandria – Protezione Civile. (2019). *Indicazioni operative per la gestione del materiale legnoso in alveo*.
- Ravazzolo, D., Mao, L., Picco, L., & Lenzi, M. A. (2015). Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. *Geomorphology*, 228, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.012>
- Regione Piemonte – Direzione Opere Pubbliche, D. del S. (2020). *Linee guida per la gestione del materiale legnoso in alveo*.
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Marti-Cardona, B., Díez-Herrero, A., & Bodoque, J. M. (2014). Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics*, 16(5), 1077–1096. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.026>

- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., & Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611–652. <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>
- Ruiz-Villanueva, V., Wyzga, B., Zawiejska, J., Mikuś, P., Hajdukiewicz, H., Hajdukiewicz, M., & Stoffel, M. (2016). *Large Wood Transport, Deposition and Remobilization during Floods in the Czarny Dunajec River: Outcomes from Numerical Modelling* (pp. 103–125). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41923-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41923-7_6)
- Trigila, A., Iadanza, C., Bussetini, M., & Lastoria, B. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*.
- Wohl, E. (2013). Floodplains and wood. *Earth-Science Reviews*, 123, 194–212. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.009>
- Wohl, E. (2020a). Rivers in the Anthropocene: The U.S. perspective. *Geomorphology*, 366, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.001>
- Wohl, E. (2020b). Wood process domains and wood loads on floodplains. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 144–156. <https://doi.org/10.1002/esp.4771>