

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

Analisi dell’impatto di piene consecutive su un torrente alpino

Relatore:

Prof. Lorenzo Picco

Correlatore:

Dr. Lorenzo Martini

Laureando:

Bianchet Davide

Matricola n. 2044876

Indice

Riassunto.....	9
Abstract.....	10
1. Introduzione	11
1.1 Bacino idrografico.....	11
1.2 Bacini montani.....	12
1.3 Trasporto solido.....	15
1.4 Eventi di piena.....	15
1.5 Effetti di una piena sui torrenti montani	18
2. Obiettivi	22
3. Area di studio.....	23
3.1. Bacino del Piave	23
3.2 Bacino del Cordevole	24
3.2.1 Alto Cordevole	25
3.2.2 Geomorfologia del bacino dell'alto Cordevole.....	26
3.2.3 Clima del bacino dell'alto Cordevole	26
3.2.4 Copertura forestale del bacino dell'alto Cordevole	27
3.3 Tratto oggetto delle analisi	28
4. Materiali e metodi	30
4.1 Analisi idrologica.....	30
4.2 Analisi granulometrica	30
4.3 Rilievi con drone.....	31
4.4 Analisi morfologica	33
4.5 Analisi del legname in alveo	34
5. Risultati.....	35
5.1 Idrologia.....	35

5.2 Granulometria	37
5.3 Morfologia	39
5.4 Legname in alveo	44
5.4.1 Elementi singoli	44
5.4.2 Accumuli	46
5.4.3 Legname totale	48
6. Discussioni	50
7. Conclusioni	54
8. Bibliografia	55
9. Sitografia	58

Indice delle figure

Figura 1: schema di un bacino idrografico (Ferro,2002)	12
Figura 2.1:Schema di raffigurazione delle tipologie di fondo cascade (A), step-pool (B), plane bed (C), riffle-pool (D) e dune ripple (E) dalla classificazione di Montgomery e Buffington (Rinaldi, 2016).	14
Figura 2.2:Morfologie dei corsi d'acqua montani in relazione alle condizioni di capacità di trasporto e di alimentazione di sedimenti (Rinaldi, 2016).	14
Figura 3:Esempio d'idrogramma di piena (Bin A., 2019).	17
Figura 4: Bilancia di Lane (Rinaldi, 2016).	20
Figura 5: Visuale generale del bacino idrografico del Piave (in arancione) e del bacino del Cordevole (in viola).	23
Figura 6: Bacino idrografico del Cordevole (in viola) e sottobacino dell'alto Cordevole (in rosso).	25
Figura 7: DEM bacino dell'alto Cordevole con distribuzione delle quote.	25
Figura 8: Precipitazioni e temperature medie mensili, ottenute dai dati delle stazioni ARPAV di Caprile e Arabba nel periodo 1994-2023.	27
Figura 9: Copertura forestale nel bacino dell'alto Cordevole.	28
Figura 10.1: Dettaglio del tratto oggetto delle analisi.	29
Figura 10.2: Torrente Cordevole a valle del ponte della SP563 a Saviner di Laste.	29
Figura 11: Piano di volo del drone per l'area studio di Saviner con a destra riportati alcuni parametri (Immagine da Martini L.).	33
Figura 12.1: Idrogramma di piena ed istogramma delle precipitazioni, per il periodo 14/10/2023-16/11/2023.	35
Figura 12.2 : Idrogramma del primo evento di piena e relativo istogramma delle precipitazioni.	
Figura 12.3: Idrogramma del secondo evento di piena e relativo istogramma delle precipitazioni.	37
Figura 13.1: Distribuzione delle frequenze relative pre e post eventi.	38
Figura 13.2: Frequenze cumulate pre e post eventi.	39
Figura 14.1: Profilo altimetrico della sezione numero 1, pre e post eventi.	40
Figura 14.2: Profilo altimetrico della sezione numero 2, pre e post eventi.	40
Figura 14.3: Profilo altimetrico della sezione numero 3, pre e post eventi.	41
Figura 14.4: Profilo altimetrico della sezione numero 4, pre e post eventi.	42
Figura 14.5: Profilo altimetrico della sezione numero 5, pre e post eventi.	42
Figura 14.6: Profilo altimetrico della sezione numero 6, pre e post eventi.	43
Figura 15.1: Box plot delle lunghezze degli elementi singoli pre e post eventi.	44

Figura 15.2: Box plot dei diametri degli elementi singoli pre e post eventi.	45
Figura 15.3: Box plot del volume degli elementi singoli pre e post eventi.	45
Figura 16.1: Nox plot delle lunghezze degli elementi negli accumuli pre e post eventi.	46
Figura 16.2: Box plot dei diametri degli elementi negli accumuli pre e post eventi.	47
Figura 16.3: Box plot del volume degli elementi negli accumuli pre e post eventi.....	47
Figura 17.1: Box plot delle lunghezze degli elementi totali pre e post eventi.	48
Figura 17.2:Box plot dei diametri degli elementi totali pre e post eventi.....	48
Figura 17.3: Box plot del volume degli elementi totali pre e post eventi.	49

Indice delle tabelle

Tabella 1: Parametri morfometrici bacino dell'alto Cordevole.....	26
Tabella 2.1: Data di inizio e fine, portata massima, precipitazione cumulata ed intensità massima relative al primo evento di piena.....	36
Tabella 2.2: Data di inizio e fine, portata massima, precipitazione cumulata ed intensità massima relative al secondo evento di piena	37
Tabella 3: Diametri caratteristici e deviazione standard della distribuzione pre e post evento.	38
Tabella 4: Numero degli elementi legnosi singoli, degli elementi negli accumuli e volume pre e post eventi.....	44
Tabella 5.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi singoli, più risultato dell'U-test.	44
Tabella 5.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi singoli, più risultato dell'U-test ..	45
Tabella 5.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi singoli, più risultato dell'U-test.	45
Tabella 6.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test.....	46
Tabella 6.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test.	47
Tabella 6.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test	47
Tabella 7.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi totali, più risultato dell'U-test.	48
Tabella 7.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi totali, più risultato dell'U-test	48
Tabella 7.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi totali, più risultato dell'U-test.	49
Tabella 8: Risoluzione di DEM ed ortofoto realizzati a luglio e novembre 2023.....	51

Riassunto

Il presente lavoro, mira a valutare gli effetti che due eventi di piena consecutivi, hanno esercitato su un tratto d'alveo del torrente Cordevole, situato nei pressi dell'abitato di Saviner di Laste (BL). L'obiettivo è stato quello di valutare le varie componenti che, unite, costituiscono la dinamica fluviale, quali l'idrologia, la granulometria, la morfologia e il legname in alveo.

Le analisi idrologiche sono state eseguite sui dati forniti dalla stazione idrometrica e meteorologica dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV), situata a Saviner di Laste (BL). Per l'indagine delle altre componenti, invece, ci si è serviti di rilievi sul campo effettuati prima e dopo gli eventi di piena. Per la classificazione granulometrica sono stati effettuati dei prelievi del sedimento attraverso metodo numerale con campionatura lineare, mentre le analisi della morfologia e del legname, sono basate sulla stessa metodologia di rilievo, ovvero la fotogrammetria aerea con drone. Questa tecnica ha permesso di ottenere due ortofoto e due modelli di elevazione del terreno (pre e post eventi), che una volta analizzati attraverso il software Qgis, hanno consentito di determinare quali variazioni siano state apportate dagli eventi di piena. In particolare, le variazioni morfologiche sono state individuate tracciando sei sezioni perpendicolari all'asse longitudinale dell'alveo, osservando i cambiamenti di quota dei vari punti; mentre le variazioni relative al legname in alveo, sono state analizzate attraverso la misurazione del materiale presente, servendosi delle ortofoto.

Dalle analisi effettuate è risultato che gli effetti riscontrati sono in linea con quelli tipici di eventi di piena di moderata entità quali quelli verificatesi, con diminuzione del sedimento fino e un leggero allargamento del canale fluviale, il tutto accompagnato da un aumento del materiale legnoso grossolano (*large wood*) avente dimensioni comunque coerenti con quello già presente prima degli eventi in oggetto.

Abstract

The present work aims to evaluate the effects that two consecutive flood events have exerted on a section of the Cordevole stream near the village of Saviner di Laste (BL). The aim was to evaluate the various components that together make up river dynamics, such as hydrology, sediment size, morphology, and in-stream wood.

The hydrological analyses relied on the hydrometric and meteorological station of the Regional Environmental Protection Agency of Veneto (ARPAV), located in Saviner di Laste (BL). For the investigation of the other components was carried out through field surveys conducted before and after the floods. For sediment classification, samples were collected using a numerical method with linear sampling, while the analyses of morphology and in-stream wood were based on the same survey methodology, namely aerial photogrammetry with UAV. This technique allowed the creation of two orthophotos and two digital elevation models (pre- and post-events), which, once analysed through QGIS software, made it possible to determine what variations were made by the floods. In particular, morphological changes were identified by tracing six cross-sections perpendicular to the longitudinal axis of the riverbed, observing the elevation changes at various points; while variations in in-stream wood were analysed by measuring the material using the orthophotos.

The analyses revealed that the observed effects are inline with those typical of moderate flood events, like the ones that occurred, with a decrease in fine sediment and a slight widening of the river channel, all accompanied by an increase of large wood whose dimensions are consistent to those already present before the events in question.

1. Introduzione

I torrenti montani risultano essere formazioni altamente dinamiche a causa di disturbi naturali, come gli eventi di piena, che modificano in continuazione le forme e i processi dei corsi d'acqua e dell'ambiente che li circonda (Knighton, 1998).

Lo studio di questi torrenti risulta di grande importanza in quanto permette di comprendere e prevedere gli effetti derivanti dagli eventi di piena, aspetti fondamentali sia nell'ottica della conoscenza scientifica che in quella della mitigazione del rischio idraulico.

1.1 Bacino idrografico

Un bacino idrografico viene definito da Bernini 1977, *“come il luogo dei punti da cui le acque superficiali di provenienza meteorica ruscellano verso il medesimo collettore”*. In altre parole, si intende la superficie che raccoglie le acque superficiali provenienti dalle precipitazioni e dalla fusione di nevi, facendole confluire, anche attraverso il passaggio per degli affluenti, nello stesso punto di un corso d'acqua, che prende il nome di sezione di chiusura del bacino (Rosso, 2004). A seconda di dove viene posta la sezione di chiusura, si distinguono: un bacino idrografico principale, se la sezione di chiusura viene posta sulla foce del corso d'acqua o un bacino secondario se viene posta più a monte (Ferro, 2002).

Dal punto di vista pratico, per delimitare la superficie del bacino, viene individuata la linea spartiacque o displuviale. Questa linea consiste nell'insieme dei punti con la maggior quota altimetrica, dai quali è possibile tracciare delle linee che, seguendo la massima pendenza, raggiungono la sezione di chiusura. Proprio perché le linee spartiacque sono tracciate secondo aspetti topografici, non si va a considerare la presenza di eventuali deflussi sotterranei che possono riguardare anche bacini idrografici diversi da quello d'interesse (Dallan, 2023).

All'interno del bacino sono inoltre distinguibili due zone: la rete idrografica ed i versanti. La prima consiste nell'insieme dei corsi d'acqua (primari e secondari) che raccolgono i deflussi superficiali e li trasportano verso la sezione di chiusura, mentre la seconda è costituita dalle superfici ai lati dei corsi d'acqua e sulle quali si originano i fenomeni di deflusso (solido e liquido) che vengono poi convogliati nei rami della rete idrografica.

I vari rami costituenti la rete idrografica possono essere classificati con il metodo di Horton-Strahler, il quale va ad attribuire ai vari canali un numero d'ordine, partendo dall' 1 per i rami sorgente e via via salendo man mano che rami dello stesso ordine si incontrano (ad esempio due rami di primo

ordine che si incontrano, andranno a formare un ramo di secondo ordine, mentre un ramo di primo ordine ed uno di secondo, formeranno un ramo di secondo ordine); l'ordine dei rami andrà via via aumentando fino al ramo principale che raggiunge la sezione di chiusura il cui ordine definirà anche quello del bacino (Rosso, 2004).

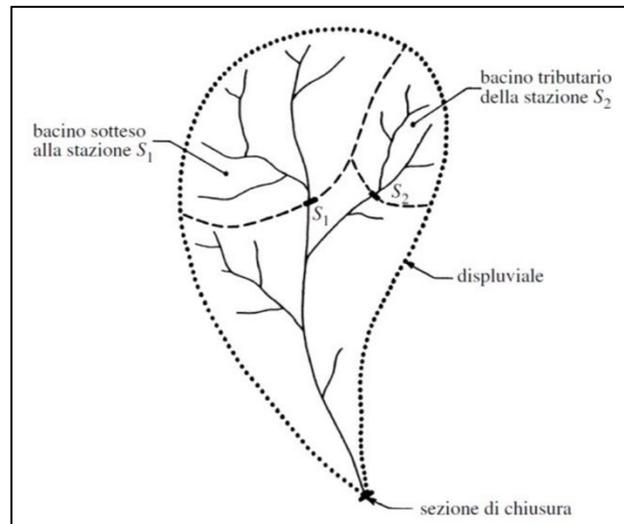


Figura 1: schema di un bacino idrografico (Ferro, 2002)

1.2 Bacini montani

I bacini montani, solitamente, sono bacini di ordine basso (reticolo idrografico con pochi rami) aventi superficie ridotta, a causa della presenza di numerosi rilievi che fungono da linea spartiacque. Questi bacini si contraddistinguono per pendenze elevate sia sui versanti che a livello dei canali, i quali presentano sezioni di dimensioni generalmente contenute. I sedimenti presenti in questi bacini sono quasi sempre grossolani ed eterogenei, il che porta ad avere un'elevata scabrezza che rallenta il regime di corrente (Rinaldi, 2016). Inoltre, la diversa granulometria, unita a periodi di scarso approvvigionamento di materiale, fanno sì che la corrente trasporti solo i sedimenti più piccoli, mantenendo il materiale grossolano che può andare a formare una sorta di barriera sotto la quale si potranno nuovamente trovare elementi con granulometria fine; questo fenomeno prende il nome di corazzamento (Parker, 1982).

Concentrandosi sull'ambiente alpino, i reticoli idrografici possono essere divisi secondo D'Agostino (2005) in:

- rete colluviale periferica, dove il deflusso intermittente non è in grado di effettuare una selezione dei sedimenti, mentre in caso di piene infrequenti, si può verificare un trasporto massivo (i sedimenti avranno granulometria eterogenea) sotto forma di colate detritiche o fangose;

- reticolo alluvionale, dove l'acqua scorre sul sedimento con un flusso più o meno costante, dando origine a fenomeni di trasporto e selezione che portano nel tempo a modificazioni graduali della morfologia fluviale.

Questa divisione del reticolo è ben osservabile, soprattutto, durante gli eventi estremi che portano a scavo con produzione improvvisa e abbondante di sedimenti nella parte colluviale e deposizione nella parte alluvionale (Pellegrini, 2021).

Tenendo in considerazione la relazione tra pendenza e forma del fondo, è stata proposta da Montgomery e Buffington (1997) una classificazione delle diverse morfologie (*figure 2.1 e 2.2*), che è ad oggi la più utilizzata per i corsi d'acqua montani.

Questa classificazione basandosi appunto sull'influenza che la pendenza esercita sulla forma del fondo e quindi sui processi di sedimentazione, va ad individuare cinque tipologie di alveo:

- *Cascade* (rapida): tratti caratterizzati da corrente a velocità sostenuta con il verificarsi di getti in caduta, risalti idraulici e separazione della corrente a causa di grossi clasti. Questa formazione morfologica è tipica di alvei confinati ad elevata pendenza (7%-20%) con sedimenti di dimensioni elevate;
- *Step-pool*: tratti caratterizzati dall'alternarsi di formazioni a gradini (*step*) e pozze (*pool*). I gradini sono costituiti da grossi massi incastrati e disposti perpendicolarmente alla direzione della corrente (Lenzi et al., 2000), mentre le pozze sono lo spazio che intercorre tra un gradino e il suo successivo e sono caratterizzate dalla presenza di sedimento molto più fine rispetto a quello che costituisce i gradini. Questa tipologia di alveo è ritrovabile in corsi d'acqua con pendenze che vanno dal 5% al 15%;
- *Plane bed* (letto piano): tratti di alveo regolari senza particolari variazioni altimetriche generalmente rettilinei e con sedimenti di granulometria media. Questi tratti hanno una pendenza che va dal 1% al 3% e sono ritrovabili anche al di fuori del contesto montano;
- *Pool-riffle*: alvei che presentano un alternarsi di tratti con pendenza sostenuta e profondità di flusso modesta (*riffle*) con tratti più pianeggianti aventi tiranti idraulici maggiori (*pool*) che si presentano distanziati di 5-7 volte la larghezza del canale. Questi tratti sono tipici dei fondovalle e delle aree pedemontane dove le pendenze vanno dallo 0,1% al 2% e i canali non sono completamente confinati; i sedimenti vanno dalla sabbia alle pietre;
- *Dune ripple*: tratti di alveo costituiti da sabbia, che va a formare sul fondo del canale delle piccole dune o delle increspature. Questa morfologia può essere riscontrata nei tratti con

pendenza minore dello 0,5% e dipende dal tirante idraulico, dalla velocità della corrente, dalle dimensioni del materiale, dal tasso di trasporto e dalla planimetria del corso d'acqua.

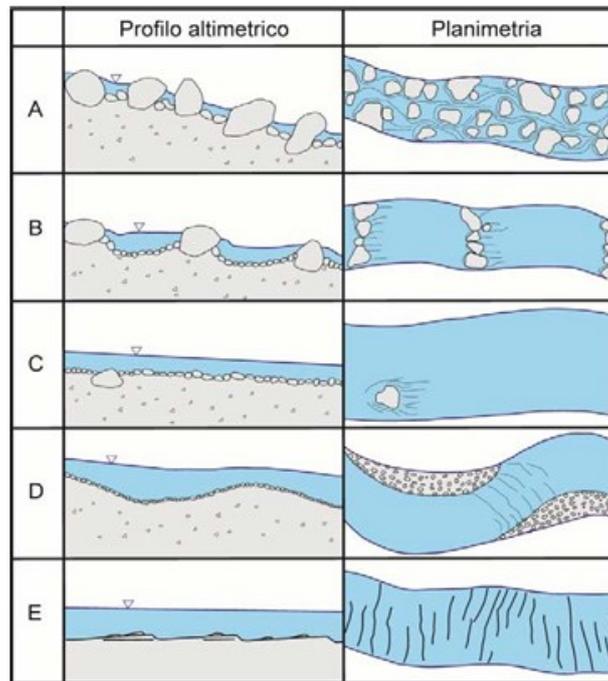


Figura 2.1: Schema di raffigurazione delle tipologie di fondo cascade (A), step-pool (B), plane bed (C), riffle-pool (D) e dune ripple (E) dalla classificazione di Montgomery e Buffington (Rinaldi, 2016).

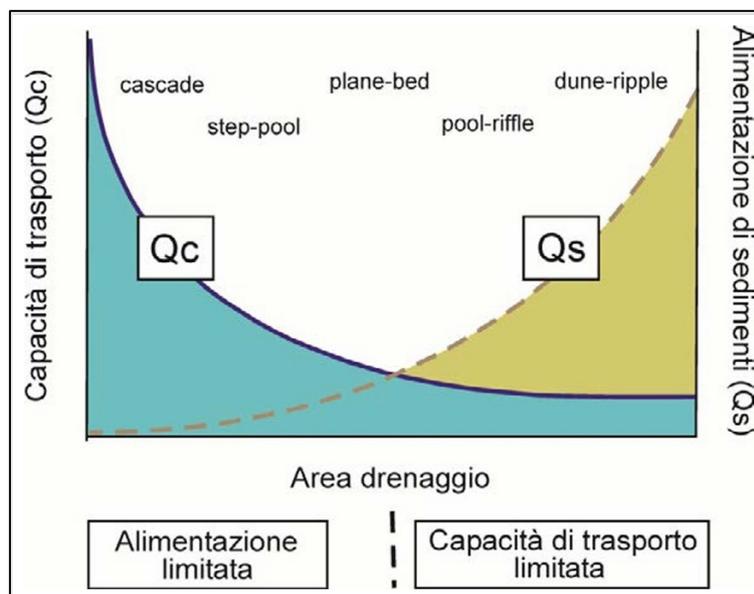


Figura 2.2: Morfologie dei corsi d'acqua montani in relazione alle condizioni di capacità di trasporto e di alimentazione di sedimenti (Rinaldi, 2016).

La classificazione di Montgomery e Buffington è stata rivista da Lenzi et al. (2000) con l'aggiunta di alcune forme morfologiche come: *riffle-step-pool* (gradino di sedimenti che costituisce una ripida rampa terminante in una pozza), i *transverse rib* (formazione di ciottoli disposta trasversalmente al corso d'acqua), le cascate (salti isolati con altezza superiore ai 3 metri), i tratti a barre e raggruppamenti (barre e rapide disposti irregolarmente), i tratti deposizionali (in corrispondenza degli allargamenti dell'alveo, dove la pendenza è minore) ed i tratti meandriiformi (tratti con anse curvilinee che si susseguono in modo discontinuo ed irregolare, tipici di valli ampie e con pendenza ridotta).

1.3 Trasporto solido

Il fenomeno del trasporto solido si verifica quando la corrente idrica, in funzione della propria turbolenza e velocità, è in grado di trasportare materiale solido di diversa granulometria, derivante dai processi erosivi a monte oppure presente lungo il corso d'acqua (erosioni spondali e scavi dell'alveo; Ferro, 2013). Il fenomeno del trasporto solido non si presenta in forma univoca, pertanto Aulitzky (1973, 1982) ha proposto una classificazione che individua 4 tipologie di trasporto:

- trasporto in sospensione (*suspended load*) quando sedimenti fini come argille, limo e sabbia vengono movimentati dalle turbolenze della corrente idrica con una deposizione sul fondo pressoché trascurabile; si tratta della frazione più importante per molti fiumi;
- trasporto di fondo (*bedload*) quando vengono movimentati sul fondo, anche a causa di una maggiore turbolenza, sedimenti con granulometria maggiore rispetto a quelli citati in precedenza; si tratta di un fenomeno comune nei torrenti ad elevata pendenza;
- correnti iperconcentrate (*debris flood*) quando il flusso movimentava una notevole quantità di sedimento, che va dal 20% al 30% del volume totale;
- colate detritiche (*debris flow* o *mud-debris flow*) quando la concentrazione volumetrica dei sedimenti va dal 30% al 70% con la possibile presenza di massi di dimensione ciclopica; questa tipologia di trasporto, tipica della rete idrografica secondaria, influenza fortemente la geomorfologia dei fondovalle e può risultare estremamente distruttivo per le zone abitate a causa di quantitativi, dimensioni e velocità del materiale trasportato.

1.4 Eventi di piena

Un evento di piena può essere definito come un “*significativo e generalmente rapido aumento della portata di un corso d'acqua, dovuto ad un consistente evento di pioggia o allo scioglimento di un*

rilevante manto nevoso, seguito da una diminuzione, generalmente più lenta, e dal ritorno alle condizioni usuali” (Dallan, 2023).

Il tempo che l’acqua impiega per raggiungere il reticolo idrografico dipende dal percorso che quest’ultima compie. Essa potrebbe essere intercettata dalle chiome della vegetazione che ricopre il suolo e quindi poi evaporare, oppure può raggiungere il suolo per poi scorrere in superficie, o infiltrarsi nel sottosuolo in quantità che dipendono dalla tessitura del terreno. L’acqua che si filtra sfrutta la porosità del terreno, andando però progressivamente a occludere i pori facendo diminuire l’infiltrazione e favorendo lo scorrimento superficiale; il valore limite, superato il quale inizia lo scorrimento superficiale è detto infiltrazione potenziale.

Indicate alcune delle variabili che influenzano il deflusso, è possibile individuare quattro componenti che contribuiscono all’approvvigionamento dei corsi d’acqua:

- afflusso diretto, costituito dall’acqua che arriva direttamente sugli specchi liquidi che hanno una superficie generalmente minore del 5% rispetto a quella del bacino e per questo risultano trascurabili; deflusso superficiale, che si origina su terreni con scarsa permeabilità ed elevata umidità;
- deflusso ipodermico, che si verifica nella parte superficiale del suolo, dove l’acqua defluisce sfruttando vie preferenziali come spaccature e macropori, con una velocità simile a quella del deflusso superficiale. Questo deflusso è facilitato se sotto allo strato superficiale si trova del terreno dotato di maggiore impermeabilità;
- deflusso profondo o di base, si verifica quando l’acqua filtra negli strati più profondi del suolo andando ad accumularsi nelle falde e spostandosi lentamente, anche al di fuori del bacino idrografico da cui è filtrata. Gli effetti legati a questo deflusso possono essere osservabili anche mesi o anni dopo l’evento che li ha generati a seconda della struttura geologica sotterranea.

L’aumento di portata improvviso di un corso d’acqua è da ricercarsi nelle prime tre componenti, che unite, vanno a formare quello che è definito come deflusso di pioggia (Dallan, 2023).

Dal punto di vista grafico un evento di piena viene rappresentato attraverso l’idrogramma di piena (*figura 3*): una curva che mette in relazione portata (asse verticale) e tempo (asse orizzontale). La curva tipica di un idrogramma di piena (riferita ad una precipitazione costante nello spazio e nel tempo) è costituita da tre segmenti principali:

- ramo ascendente o di concentrazione, con pendenza positiva elevata indica un rapido aumento della portata;

- segmento di colmo, contiene il punto di massimo dell'idrogramma;
- ramo discendente o di esaurimento, ha una pendenza negativa, ma inferiore rispetto al ramo ascendente ed indica una diminuzione progressiva della portata.

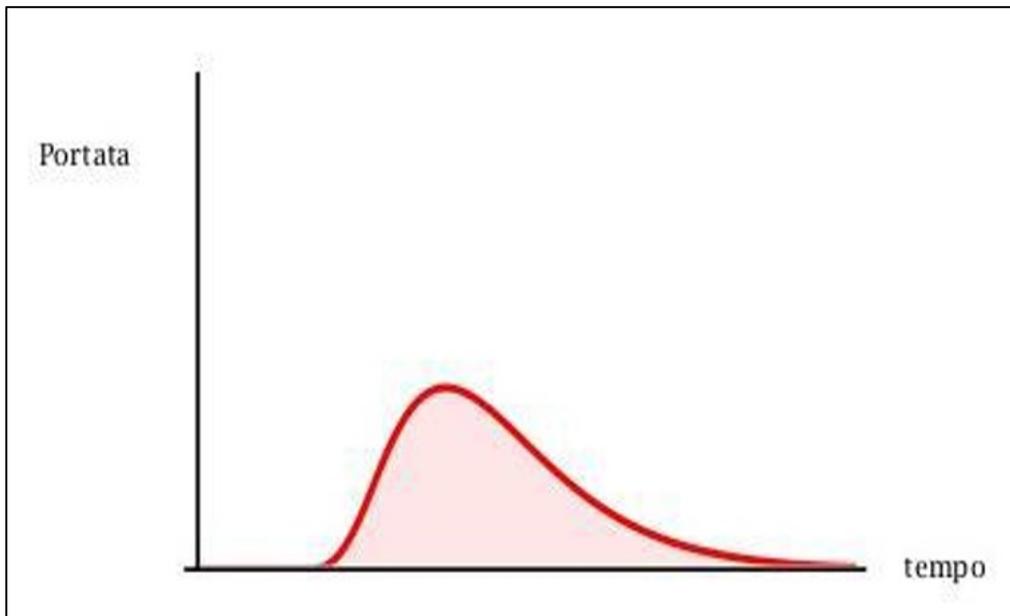


Figura 3: Esempio d'idrogramma di piena (Bin A., 2019)

La definizione di evento di piena dato finora è molto ampia, dato che potenzialmente ogni evento che crei un picco nell'idrogramma, può essere classificato come tale; si rende dunque necessario porre dei limiti minimi da soddisfare, per far sì che un aumento di portata risulti classificabile come piena. Viene così introdotto il termine portata a piene rive (indicato anche come “*bankfull discharge*”), il quale sta ad indicare la portata massima raggiungibile da un corso d'acqua senza che superi il livello delle sponde (Leopold, 1964). In particolare, questo concetto fa riferimento ad alvei naturali e pertanto il livello raggiunto da una portata “a piene rive” corrisponde a quello della piana inondabile creata dal corso d'acqua stesso in quelle condizioni di regime e che si presenta con tempi di ritorno di circa 1-3 anni (Rinaldi, 2016).

Oltre alla portata a piene rive, è possibile individuare anche altri due valori:

- portata formativa o dominante: ovvero la portata ottimale per creare modificazioni morfologiche (Wolman & Miller, 1960);
- portata efficace, ovvero la portata che riesce a trasportare la maggior quantità di sedimento in un intervallo di tempo sufficientemente ampio (Biedenharn et al., 2001). Questo valore è stato introdotto per essere unito a quelli di portata a piene rive e portata con tempo di ritorno 1-3

anni in modo da individuare un range più preciso di portata dominante (Biedenharn et al., 2001).

Particolarmente complicata è l'individuazione del livello a piene rive in casi in cui l'alveo sia in fase di incisione oppure recentemente inciso, poiché manca una piana inondabile e può esserci una variazione dimensionale dell'alveo. In questi casi il livello a piene rive corrisponde al limite oltre il quale inizia l'inondazione di un terrazzo, ovvero una piana inondabile inattiva (formatasi con condizioni diverse e non più coinvolta frequentemente a causa dell'abbassamento del fondo) ed il tempo di ritorno associato all'evento sarà di gran lunga superiore rispetto ai 3 anni (Shields et al., 2003; Simon & Castro, 2003). Tra i casi in cui è improbabile la presenza di una piana inondabile vi sono i torrenti montani (Lenzi et al., 2000), a causa delle caratteristiche descritte nei paragrafi precedenti.

La condizione di portata a piene rive risulta comunque molto importante, perché rappresenta il punto oltre il quale si passa da un processo di trasporto solido in alveo, a uno di tracimazione con modificazione della piana inondabile (Rinaldi, 2016).

1.5 Effetti di una piena sui torrenti montani

Considerando anche quanto descritto nelle sezioni precedenti, gli eventi di piena causano l'alterazione di svariate componenti del reticolo idrografico.

Considerando le variazioni morfologiche, queste vengono generalmente valutate in una scala temporale di 100 anni, tuttavia in un contesto attuale, altamente dinamico, è più opportuno ridurre l'intervallo temporale a 10/15 anni (Shields et al., 2003). Primo passo fondamentale è capire se l'alveo si trova in una situazione di equilibrio dinamico, ovvero se nell'arco temporale stabilito mantiene la sua forma e le sue dimensioni più o meno invariate, oppure in una condizione di instabilità se forma e dimensioni variano in maniera importante durante il periodo considerato.

Queste condizioni derivano dall'interazione di portata liquida e trasporto solido (variabili guida) con le caratteristiche del bacino (condizioni al contorno), come ad esempio la topografia. In caso di alterazione di una o più variabili, la condizione di equilibrio dinamico viene meno e il corso d'acqua si troverà in una condizione di instabilità con variazioni significative di forma e dimensioni, fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio.

La durata del periodo di instabilità può essere breve (alcuni anni) oppure anche molto lunga (centinaia/migliaia di anni) a seconda dell'estensione e dell'intensità della perturbazione che l'ha innescato (Rinaldi,2016).

La risposta di un alveo ad una condizione di instabilità, causata da uno o più disturbi, può manifestarsi attraverso tre principali tipi di variazione:

- altimetrica del fondo: possono essere descritte utilizzando la “bilancia di Lane” (figura 4), che mette in relazione l'energia della corrente (data dalla pendenza e dalla portata liquida) con la portata solida e la dimensione dei sedimenti; infatti all'aumentare dell'energia della corrente o al diminuire della portata solida o della dimensione dei sedimenti, viene associato un fenomeno di incisione, ovvero l'abbassamento del fondo dell'alveo, viceversa se si abbassa l'energia della corrente oppure aumenta il trasporto solido o la dimensione dei sedimenti, si avranno fenomeni di sedimentazione e quindi un innalzamento del fondo dell'alveo (Lane,1955). Questi processi tendono generalmente a non riguardare una zona concentrata dell'alveo, poiché tendono a “spostarsi” lungo il corso d'acqua; un'incisione tende a migrare verso monte (fino al raggiungimento di un'interruzione dell'alveo come una briglia, una diga o un salto di roccia), mentre a valle si formeranno dei depositi di sedimenti che possono derivare direttamente dai fenomeni incisivi o di erosione spondale (Schumer al., 1984; Simon, 1989). Risulta importante sottolineare come i fenomeni di sedimentazione ed incisione vengano influenzati anche da elementi come i detriti legnosi di grosse dimensioni, che possono interagire con elementi fissi presenti nell'alveo, formando degli accumuli che riducono l'energia della corrente e facilitano la deposizione a monte degli stessi, andando allo stesso tempo ad innescare fenomeni d'incisione sul lato a valle (Montgomery, 2003);
- della larghezza: le possibili variazioni sono l'allargamento ed il restringimento, ma si tratta di variazioni meno facilmente inquadrabili con dei modelli; un esempio sono le relazioni di Schumm (1977) che esprimono la proporzionalità diretta o inversa delle variabili guida con delle variabili legate alla forma dell'alveo, affermando in linea generale che a parità di altri fattori, un aumento delle portate può causare un allargamento dell'alveo, mentre una diminuzione può portare ad un restringimento;
- della configurazione morfologica: sono modificazioni planimetriche della morfologia del corso d'acqua, che può passare ad esempio da una configurazione a canale singolo ad una a

canali multipli. Nei casi di queste variazioni, la variabile più soggetta a mutare è la larghezza dell'alveo, mentre le variazioni di pendenza sono più contenute, anche se possono essere sufficienti per determinare il passaggio da una morfologia a un'altra.

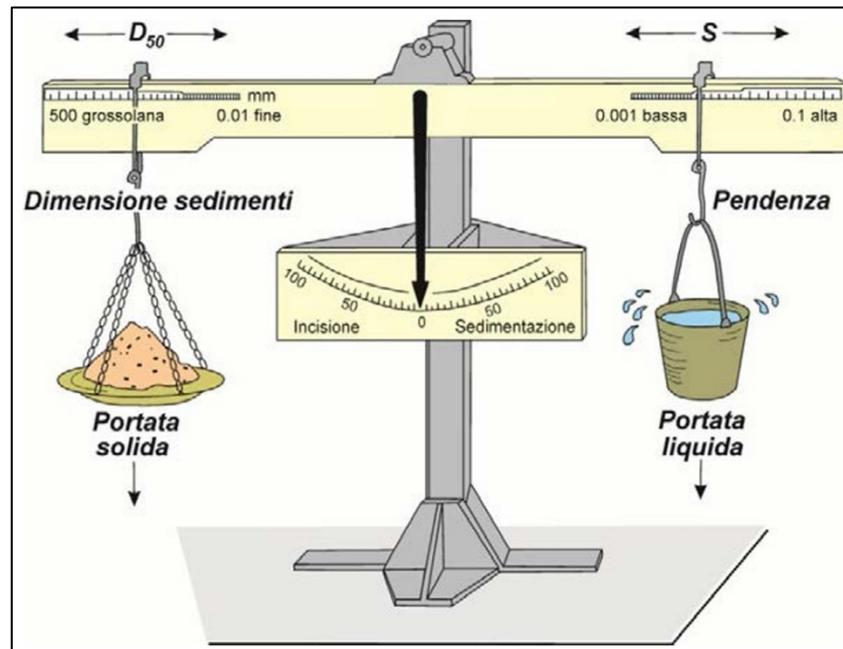


Figura 4: Bilancia di Lane (Rinaldi, 2016).

Modificazioni della larghezza e della configurazione morfologica dell'alveo, sono fenomeni rari da osservare nei torrenti montani, dove spesso gli alvei sono naturalmente od artificialmente confinati, mentre per quanto riguarda l'altezza del fondo d'alveo, le variazioni sono molto più frequenti.

Un'altra componente fondamentale dei bacini montani forestati è il legname in alveo. Il legname risulta di grande importanza nelle dinamiche fluviali anche se l'inizio del suo studio è relativamente recente. Le prime documentazioni si rifanno agli eventi alluvionali che hanno colpito le Alpi negli anni '60 e '80, quando si è resa evidente la capacità dei detriti legnosi di creare ostruzioni anche pericolose per gli insediamenti umani (Comiti, 2016).

Il materiale legnoso di maggior interesse, per la sua capacità di influenzare i processi idraulici, geomorfologici ed ecologici, è quello definito come *large wood* o legname grossolano, caratterizzato da elementi con diametro minimo di 10 centimetri e lunghezza superiore a 1 metro.

I processi riguardanti il legname in alveo, oltre ad influenzare come già visto il trasporto di sedimento, presentano con esso anche alcune analogie. Secondo Gurnell et al. (2003) si possono individuare:

- meccanismi di produzione e alimentazione del sistema fluviale: le cause dell'ingresso in alveo del materiale legnoso possono essere svariate come movimenti di versante, azione del vento, precipitazioni nevose, incendi, mortalità indotta da organismi viventi, erosione delle sponde o erosione di superfici interne all'alveo o della piana inondabile (Gurnell et al., 2003); nei bacini montani, l'immissione del materiale viene attribuita nelle parti alte del bacino, maggiormente a frane e colate detritiche, mentre nelle zone di fondovalle all'erosione spondale (Comiti et al. 2012);
- processi di mobilità e trasporto: una volta raggiunto l'alveo, il materiale può accumularsi subito, oppure venire trasportato dal flusso della corrente. La movimentazione nei torrenti montani, come analogamente accade con il trasporto solido, avviene in maniera discontinua a causa del regime di portata irregolare; il trasporto del materiale grossolano, si avrà quindi generalmente solo in caso di eventi con tempo di ritorno maggiore di 10-50 anni (Rinaldi, 2016), quando l'altezza del flusso liquido supera la profondità di galleggiamento del materiale, oppure quando la forza della corrente è tale da vincere la resistenza esercitata dal materiale dell'alveo (Braudrick, 2001);
- processi di deposizione: nei tratti d'alveo ampi, aventi larghezza superiore alla lunghezza del legname, la deposizione si verifica quando l'energia o la profondità del flusso risultano insufficienti per mantenere una condizione di trasporto, oppure se il sedimento incontra ostacoli come grossi massi o ponti; discorso analogo vale per i corsi d'acqua a sezione ridotta, con l'aggiunta che in questi, spesso la lunghezza del legname risulta superiore alla larghezza dell'alveo e pertanto il materiale trasportato tenderà ad incastrarsi con maggior facilità tra gli elementi presenti sulle sponde come massi o vegetazione arborea (Comiti et al., 2012). La distanza che i detriti sono in grado di percorrere all'interno dei canali permette di realizzare una classificazione degli accumuli, andando così ad avere tre possibili situazioni, ovvero: materiale autoctono o in sito, combinazione di elementi in sito e trasportati ed elementi trasportati (Abbe & Montgomery 2003).

Considerati dunque i molteplici effetti delle piene sulle svariate componenti, è necessario analizzare la risposta di un torrente montano utilizzando diversi approcci che aiutino a comprendere l'impatto dell'evento di piena nel suo insieme. Per questo vi è la necessità di studiare in maniera integrata la dinamica idrologica, morfologica, sedimentologica, e del legname in alveo.

2. Obbiettivi

Il torrente Cordevole, essendo un corso d'acqua montano, è spesso soggetto ad oscillazioni anche brusche della portata idrica durante il corso dell'anno. Con questo lavoro si vuole esaminare il periodo a cavallo tra i mesi di ottobre e novembre 2023, analizzando quattro elementi in particolare:

- l'idrologia, per capire quanti e con quale intensità, si sono verificati gli eventi di piena durante il suddetto periodo;
- la granulometria, andando ad individuare le dimensioni dei sedimenti pre e post eventi per valutare l'effetto del trasporto solido ad opera delle piene;
- la morfologia, andando a realizzare analisi topografiche su alcune sezioni dell'alveo, in modo da comprendere le alterazioni dello stesso dovute a processi di deposizione o scavo;
- il legname in alveo, andando ad individuare tutti i residui legnosi identificabili come *large wood*, discretizzandoli in base alla disposizione se singoli o in accumuli e misurandone dimensioni e volume, in modo da quantificare l'effetto che gli eventi di piena hanno avuto su questa tipologia di elementi. Inoltre, si vuole valutare la coerenza della tipologia di legname rilasciata dalle piene con quella presente prima del periodo indagato.

3. Area di studio

Il presente lavoro è stato effettuato concentrandosi su un tratto del torrente Cordevole, facente parte del bacino idrografico del Piave e suo principale immissario.

3.1. Bacino del Piave

Il Piave sorge alle pendici del Monte Peralba ad una quota di 2037 m s.l.m. e sfocia nel Mar Adriatico nei pressi di Porto Cortellazzo (VE), dopo aver percorso circa 222km. Il suo bacino idrografico si estende su una superficie di circa 4000km² di cui quasi la totalità in Veneto (ad eccezione di alcune porzioni in Friuli-Venezia Giulia, e Trentino-Alto Adige), sviluppandosi prevalentemente in territorio montano (Alpi centro-orientali e Prealpi) e andando poi ad attraversare la Pianura Padana. Il bacino idrografico si considera chiuso nei pressi di Nervesa della Battaglia (TV), poiché più a valle non sono presenti affluenti superficiali (tranne una rete di canali artificiali), mentre a causa del materiale grossolano (sabbia e ghiaia) che costituisce l'alveo, si verificano importanti fenomeni di filtrazione verso un reticolo sotterraneo che restituisce poi parte delle acque più a valle sotto forma di risorgive (Distretto Alpi Orientali, 2023).

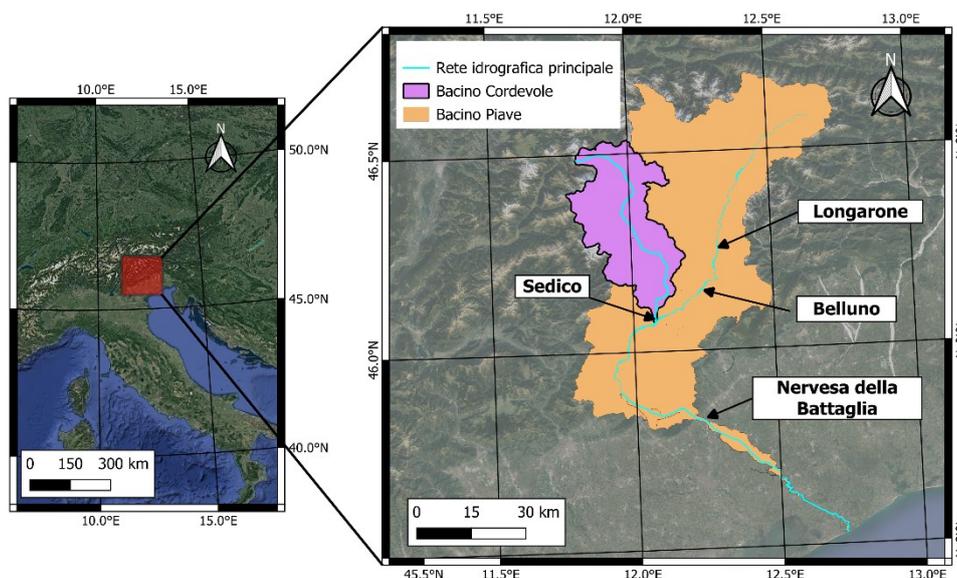


Figura 5: Visuale generale del bacino idrografico del Piave (in arancione) e del bacino del Cordevole (in viola).

Il bacino del Piave può essere diviso in quattro sottobacini principali (Distretto Alpi Orientali, 2023):

- l'alto corso, che comprende le zone di Comelico, Cadore, Valle del Boite e Valle di Zoldo con un'area di 1.537 km², un'altitudine massima di 3.250 m s.l.m. e media di 1.597 m s.l.m. e con la sezione di chiusura posta alla confluenza con il torrente Maè a Longarone (BL) a quota 436 m s.l.m.;

- il bacino della Valbelluna, che si estende dalla confluenza con il Maè a Longarone (BL) fino a Pederobba (TV), comprendendo la zona dell'Alpago e dei bacini del Caorame e del Sonna, con un'area di 1.079 km², un'altitudine massima di 2.550 m s.l.m., una media di 806 m s.l.m. e una minima di 135 m s.l.m.;
- il bacino del Cordevole, localizzato nella parte occidentale della Provincia di Belluno, con un'area di 829,20 km², un'altitudine massima di 3330 m s.l.m. e media di 1.500 m s.l.m. e con la sezione di chiusura posta alla confluenza con il Piave a Sedico (BL), a quota 275 m s.l.m.;
- la zona delle Prealpi e della Pianura, comprendente il bacino del Soligo e la zona di pianura, con un'estensione di 455 km² che va da Pederobba (TV) fino alla foce a Porto Cortellazzo (VE), un'altitudine massima di 1462 m s.l.m. e media di 218 m s.l.m.

3.2 Bacino del Cordevole

Come sopraccitato, il bacino oggetto d'analisi è quello del Cordevole; questo corso d'acqua, situato nella parte nord-occidentale della provincia di Belluno segna il confine tra le Dolomiti orientali e quelle occidentali ed è il principale affluente del Piave. Il Cordevole sorge nel gruppo del Sella in prossimità del Passo Pordoi a quota 2237 m s.l.m. nel comune di Livinallongo del Col di Lana (BL) e termina immettendosi nel Piave dopo 79 km, nella zona di Sedico (BL) a quota 275 m s.l.m..

I principali affluenti sono, procedendo da monte verso valle, l'Andraz a Digionera, il Fiorentina a Saviner di Laste, il Pettorina a Caprile, il Biois a Cencenighe Agordino, il Tegnias a Taibon Agordino ed infine, a pochi chilometri dall'immissione nel Piave, il Mis in località Oregne.

Durante il suo percorso il Cordevole è interrotto più volte da sbarramenti artificiali, realizzati per fini energetici e situati ad Alleghe (diga) e Cencenighe Agordino (diga); inoltre sono presenti anche le opere di La Stanga (opera di presa) e Ponte Mas (impianto con turbina a coclea) che però non vanno a formare degli invasi. Viene segnalato che oltre alle opere appena indicate, è presente, un abbozzo di diga mai ultimata, che ad oggi svolge la funzione di briglia, collocato nei pressi di Digionera, a monte di Caprile.

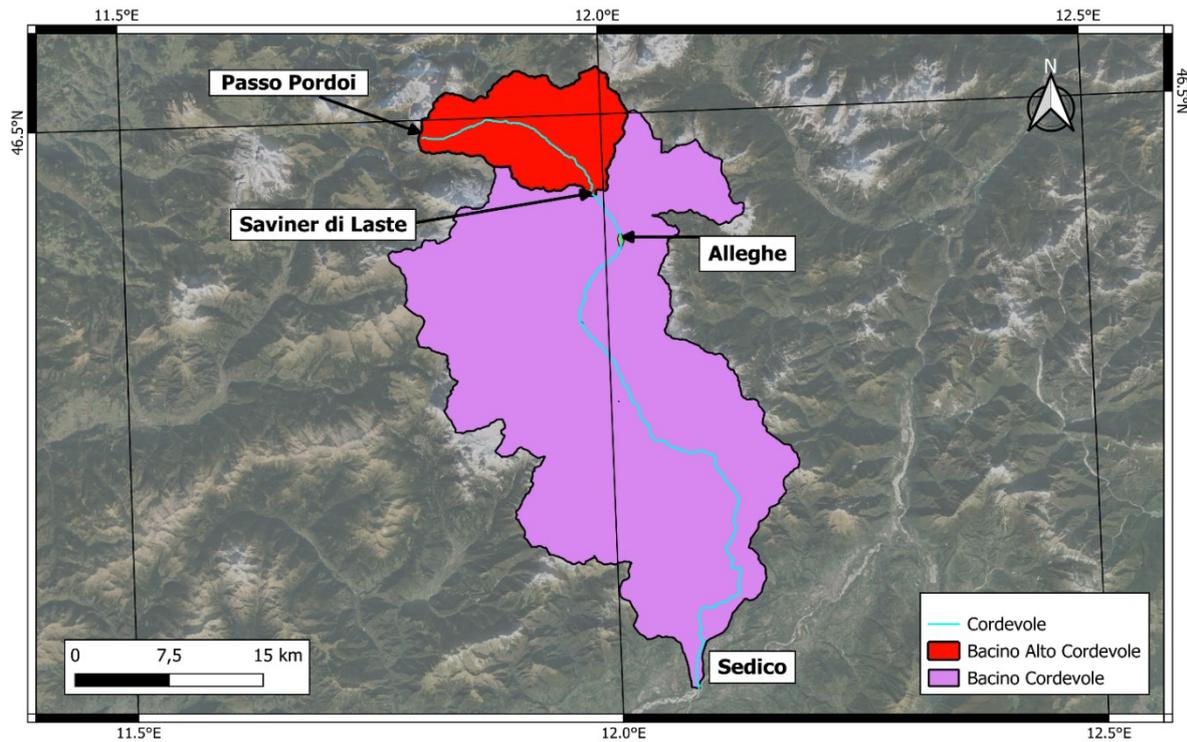


Figura 6: Bacino idrografico del Cordevole (in viola) e sottobacino dell'alto Cordevole (in rosso).

3.2.1 Alto Cordevole

Effettuando un ulteriore ingrandimento verso l'area di studio, si va a considerare la parte alta del bacino del Cordevole, ponendo la sezione di chiusura alla confluenza con il torrente Pettorina (affluente di destra) a Saviner di Laste ed ottenendo così un bacino di quinto ordine che si estende per 109.8 km².

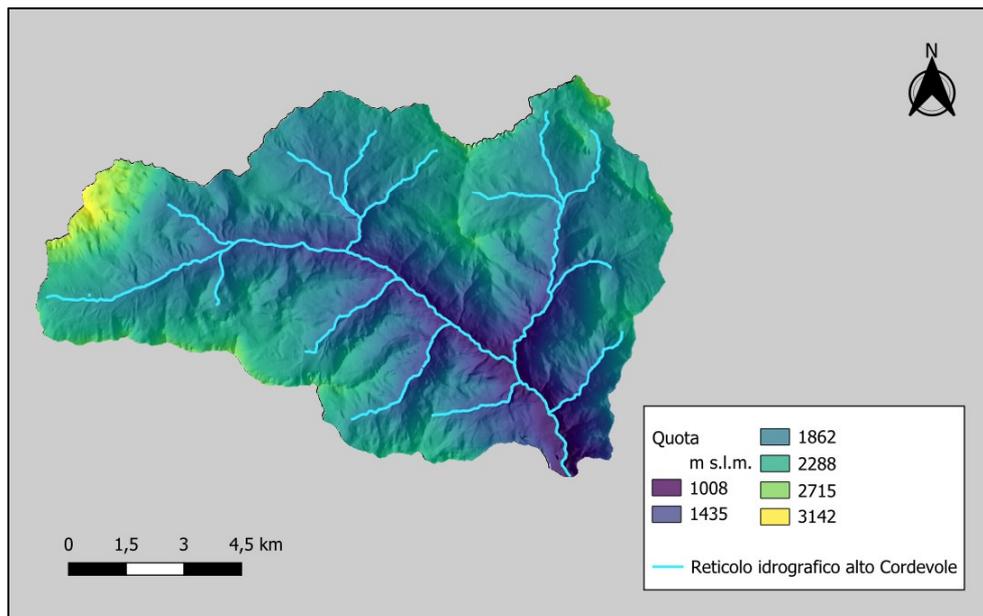


Figura 7: DEM bacino dell'alto Cordevole con distribuzione delle quote.

Sopra in *figura 3* è rappresentata la mappa delle elevazioni, mentre sotto in *tabella 1* sono riportati i principali i parametri morfometrici che caratterizzano il bacino.

Tabella 1: Parametri morfometrici bacino dell'alto Cordevole.

Parametri morfometrici	
Area (km ²)	109,6
Perimetro (km)	53,8
Quota max. (m s.l.m.)	3142
Quota min. (m s.l.m.)	1008
Quota media (m s.l.m.)	1902
Pendenza max (%)	74,7
Pendenza min (%)	0
Pendenza media (%)	25,9
Lunghezza tot. Reticolo (km)	143,8
Esposizione prevalente	S-SE

3.2.2 Geomorfologia del bacino dell'alto Cordevole

Dal punto di vista geomorfologico, la valle del Cordevole è caratterizzata da pareti laterali ripide e fondo a tratti relativamente piatto (sul quale si sviluppano spesso conoidi alluvionali), caratteristiche che fanno assumere alla sezione trasversale della valle la caratteristica forma ad U tipica delle valli glaciali, mentre i vari affluenti scorrono all'interno di valli fluviali dalla tipica sezione a V. La litologia del bacino vede una prevalenza di rocce carbonatiche dotate di buone caratteristiche geomeccaniche, che permettono di avere rilievi alti con grandi pareti verticali, ma suscettibili ai fenomeni erosivi tipici del carsismo, il che, unito alla presenza di un quaternario ricco di argille, fa sì che i fenomeni franosi siano molto frequenti (Soccol e Tessarolo, 2003; Pavan, 2011).

3.2.3 Clima del bacino dell'alto Cordevole

Dal punto di vista climatico, il bacino idrografico dell'alto Cordevole può essere suddiviso in due aree. La zona più a Nord ricade in un clima di tipo Endalpico, contraddistinto da un'elevata escursione termica e da un regime pluviometrico continentale, mentre la parte Sud del bacino è caratterizzato invece da un clima di tipo Mesalpico, che comporta delle precipitazioni distribuite in modo uniforme nel periodo che va da aprile a novembre. Le temperature sono abbastanza variabili a causa delle importanti variazioni di quota, con una media annuale attorno ai 6°C, mentre le precipitazioni si attestano attorno ai 1100mm. In *figura 4* vengono riportate le precipitazioni e le temperature medie mensili rilevate nel periodo 1994-2023 presso le stazioni ARPAV di Caprile (coordinate 46°26'25.88"N;11°59'24.19"E) ed Arabba (46°30'00.08"N;11°52'34.13"E).

I valori indicati sono utili per fornire un inquadramento generale della zona, ma non risultano però rappresentativi di tutto il bacino, poiché come già detto, vengono estremamente influenzati dalle caratteristiche morfologiche del territorio, come le forti variazioni di quota e di esposizione, che determinano delle condizioni microstanziali, anche molto diverse tra loro.

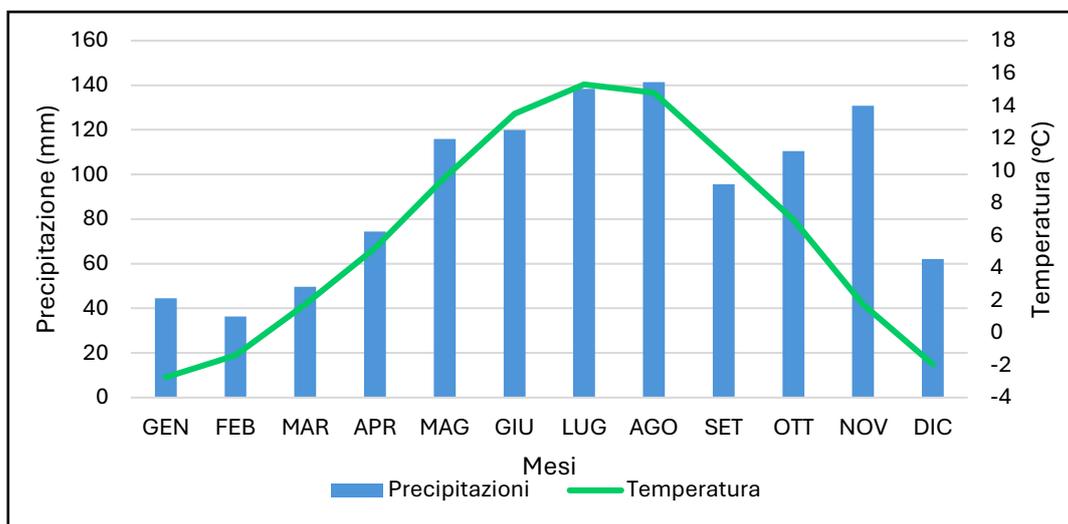


Figura 8: Precipitazioni e temperature medie mensili, ottenute dai dati delle stazioni ARPAV di Caprile e Arabba nel periodo 1994-2023.

3.2.4 Copertura forestale del bacino dell'alto Cordevole

Per quanto riguarda la copertura forestale, osservando le mappe di copertura del suolo fornite dalla Regione Veneto, si può notare come questa riguarda circa il 57% della superficie del bacino ed è costituita in prevalenza di peccete (2780 ha), che vengono poi sostituite dai 1500-1600m s.l.m. da larici-cembreti (2108 ha) e da formazioni arbustive quali mughete, alnete e saliceti; sono inoltre presenti, anche se in forma ridotta aceri-frassineti e altre formazioni di latifoglie (31 ha). La distribuzione delle specie vede nella fascia perifluviale alle quote più basse, una maggioranza di formazioni di ontano bianco (*Alnus incana (L.) Moench*), vari salici arbustivi (*Salix spp.*) ed altre specie accessorie (frassino, acero montano), sostituite poi alle quote più elevate da abete rosso (*Picea abies (L.) H Krast*) e larice (*Larix decidua Mill.*). Le piante che crescono all'interno della fascia riparia sono generalmente di dimensioni contenute, con diametri che raramente superano i 20-30 cm.

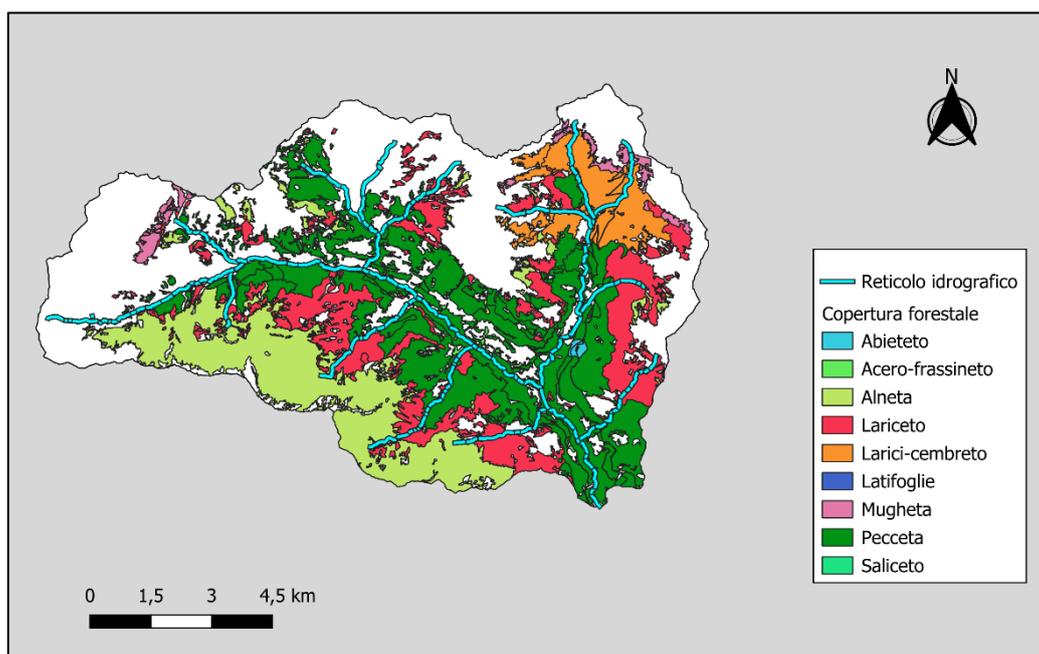


Figura 9: Copertura forestale nel bacino dell'alto Cordevole.

3.3 Tratto oggetto delle analisi

L'area soggetta ad analisi si trova a Saviner di Laste e consiste nel tratto di Cordevole che va dal ponte della SP563 (che collega Caprile a Saviner di Laste) fino alla confluenza con il torrente Pettorina. Il sito si trova a poco più di 200m dalla stazione di rilevamento ARPAV posta in corrispondenza di una briglia a monte del ponte.

Il tratto analizzato ha una lunghezza di circa 300 m e parte da una quota di 1058 m s.l.m., arrivando a 1051m s.l.m., quindi con un dislivello totale di 7 m corrispondente ad una pendenza del 2,3%.

Per tutta la lunghezza del tratto, il canale è confinato ambo i lati da muri in calcestruzzo alti all'incirca 4m che limitano la larghezza del canale a 30-35 m, mentre la larghezza associata al livello di piene rive (*bankfull*) è di circa 15 metri e corrisponde ad una portata approssimativamente di 20 m³/s.

Nei primi metri, il corso risente della presenza delle pile del ponte, a cui segue un fondo con profilo a gradiente abbastanza uniforme (a differenza del tratto a monte del ponte che presenta un alveo con elementi più grandi ed eterogenei) che gli fa assumere le caratteristiche di una morfologia quasi a letto piano; inoltre, nel tratto finale vicino alla confluenza con il Pettorina, la pendenza tende ad aumentare variando ulteriormente la morfologia. (Taffarello, 2013).

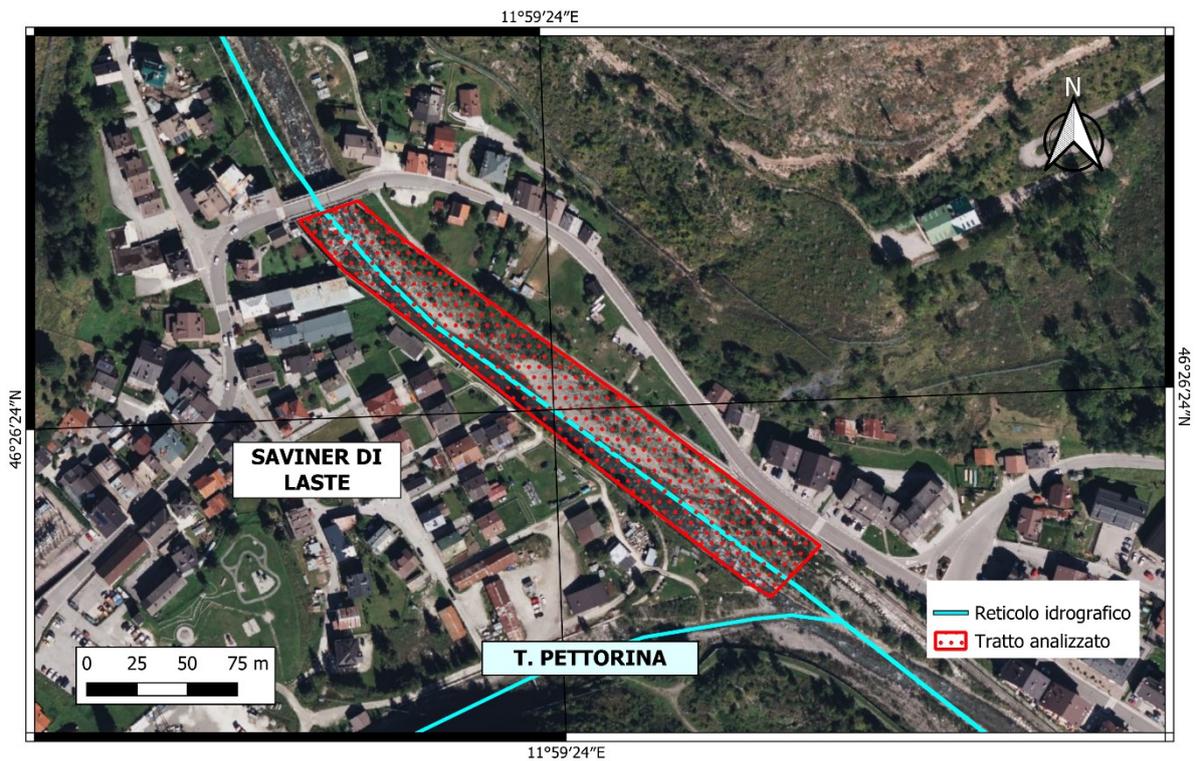


Figura 10.1: Dettaglio del tratto oggetto delle analisi.



Figura 10.2: Torrente Cordevole a valle del ponte della SP563 a Saviner di Laste.

4. Materiali e metodi

La valutazione degli effetti delle piene consecutive, si è basata principalmente su quattro analisi:

- idrologica
- granulometrica
- morfologica
- del legname in alveo

4.1 Analisi idrologica

I dati riguardanti la portata liquida e la precipitazione, sono stati ricavati dalla stazione dell’Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV), situata in corrispondenza di una briglia circa 230 m a monte dell’area di studio. I dati presi in esame comprendono il periodo che va dal 14/10/2023 (ore 00:00) al 16/11/2023 (ore 23:00), rilevati ad intervalli temporali di un’ora. Con i suddetti dati sono stati realizzati diversi idrogrammi di piena (con relative precipitazioni), il primo con una visuale generale del periodo, mentre gli altri con una visione dettagliata sulle variazioni di portata, considerando un intervallo temporale di 48h.

Dalla visualizzazione dei grafici si è andati a valutare quali variazioni di portata avessero superato il livello di portata a piene rive e che quindi fossero realmente considerabili come eventi di piena; inoltre, sono state individuate le altezze di pioggia associate ad ogni evento.

4.2 Analisi granulometrica

La granulometria pre e post eventi è stata valutata attraverso l’analisi numerale con campionatura in linea, metodologia che meglio si adatta a torrenti montani con alvei stretti e dai sedimenti grossolani ed eterogenei.

La campionatura in linea viene eseguita andando a misurare con un calibro o un cavalletto forestale, il diametro dell’asse medio b (in mm) dei sedimenti ricadenti lungo una linea retta, ad intervalli fissi (misurati con una rotella metrica) pari a due volte la dimensione dell’elemento avente diametro maggiore nell’area circostante.

I dati ricavati vengono poi riportati in un foglio di calcolo, dove per ognuno di essi viene calcolato l’indice Φ attraverso la *formula 1*.

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

Successivamente, sono state determinate le varie classi di Φ , che assumono valori da -0,5 a -11, con un passo di 0,5, e vengono poi associate ad una specifica classe granulometrica (con relativo valore

medio Φ_c) secondo la scala di Udden-Wentworth della classificazione dell'American Geophysical Union.

È stata quindi determinata la numerosità per ogni classe (n), la cui somma ha portato ad ottenere la numerosità totale.

La numerosità così ottenuta è stata utilizzata per determinare la frequenza relativa e la frequenza cumulata per ogni classe; la frequenza relativa è stata calcolata dividendo il numero di valori presenti in ogni classe, per il numero di elementi totali e moltiplicando per 100 (*formula 2*), mentre la frequenza cumulata è stata ottenuta sommando la frequenza relativa di una classe, con la frequenza cumulata della classe precedente (*formula 3*).

$$f = \frac{n}{N} \cdot 100 \quad (2)$$

$$F_x = f_x + F_{x-1} \quad (3)$$

Le frequenze così ottenute sono state poi utilizzate per la produzione di grafici comparativi della situazione pre e post eventi.

Successivamente, si è passati alla determinazione dei diametri caratteristici D_x , ovvero i diametri tali per cui l' $x\%$ di tutto il sedimento ha dimensione inferiori.

Il valore $x\%$ è definito percentile e viene ottenuto attraverso la seguente formula:

$$\Phi_x = \Phi_{inf} + \frac{\Phi_{sup} - \Phi_{inf}}{F_{sup} - F_{inf}} \cdot (F_x - F_{inf}) \quad (4)$$

Dati i vari percentili è infine possibile calcolare i diametri caratteristici D_x attraverso la formula:

$$D_x = 2^{-\Phi_x} \quad (5)$$

I diametri caratteristici ricavati sono $D_5, D_{16}, D_{40}, D_{50}, D_{84}, D_{90}, D_{95}$; in particolare D_{50} corrisponde al diametro mediano, mentre la radice quadrata del rapporto tra D_{84} e D_{16} è pari alla deviazione standard σ il cui valore, se inferiore ad 1,35, indica che la distribuzione dei diametri è uniforme.

Oltre ai diametri sopracitati, è stato anche individuato il diametro medio D_m , andando a calcolare prima il phi medio (Φ_m) utilizzando la *formula 6* e successivamente il diametro con la *formula 5* come già fatto in precedenza.

$$\Phi_m = \frac{\sum f \cdot \Phi_m}{100} \quad (6)$$

4.3 Rilievi con drone

Per effettuare le analisi morfologiche e del legname, si è ricorsi alla fotogrammetria aerea, ovvero la pratica che attraverso almeno due fotogrammi prodotti da rilievi aerei, permette di determinare dimensione e posizione spaziale di un oggetto.

In particolare, i rilievi nel sito di Saviner sono stati effettuati con un drone DJI® Phantom 4 Advanced, realizzando un volo a luglio 2023 (pre eventi) ed uno a novembre 2023 (post eventi), entrambi basati sullo stesso piano di volo (visibile in *figura 11*) creato con l'applicazione (installata su tablet) DJI® Ground Station Pro che permette di determinare l'area che il drone deve coprire, il percorso che deve seguire, la velocità di volo, l'altezza di volo, la sovrapposizione delle fotografie, ecc. Per i voli in oggetto, il drone ha volato per 945m ad una velocità di 6,5 Km/h, un'altezza di 50m, scattando 52 foto georeferenziate con una sovrapposizione frontale del 65% e laterale del 75%, che hanno permesso di coprire un'area di 1,45 ha.

Le immagini ottenute sono state poi inserite all'interno del programma Agisoft Metashape®, dove sono state ordinate e migliorate dal punto di vista della georeferenziazione attraverso l'inserimento di punti di vincolo identificabili dalle immagini e dei quali sono note le coordinate (X, Y, Z). Nello specifico, sono stati rilevati dieci punti nell'area di studio attraverso lo strumento GNSS Topcon® HiperPro II RTK. Questa operazione si è resa necessaria poiché il rilevamento delle posizioni è stato affidato al ricevitore GNSS interno al drone che possiede un'accuratezza non molto elevata, anche se comunque sufficiente per la proiezione del tratto in un prefissato sistema di coordinate.

Dall'elaborazione dei dati, tramite tecnica fotogrammetrica *Structure From Motion*-MVS, è stata così prodotta l'ortofoto dell'area studio e una nuvola di punti con la quale è stato possibile realizzare un modello digitale di elevazione (DEM) per ognuno dei due rilievi eseguiti.

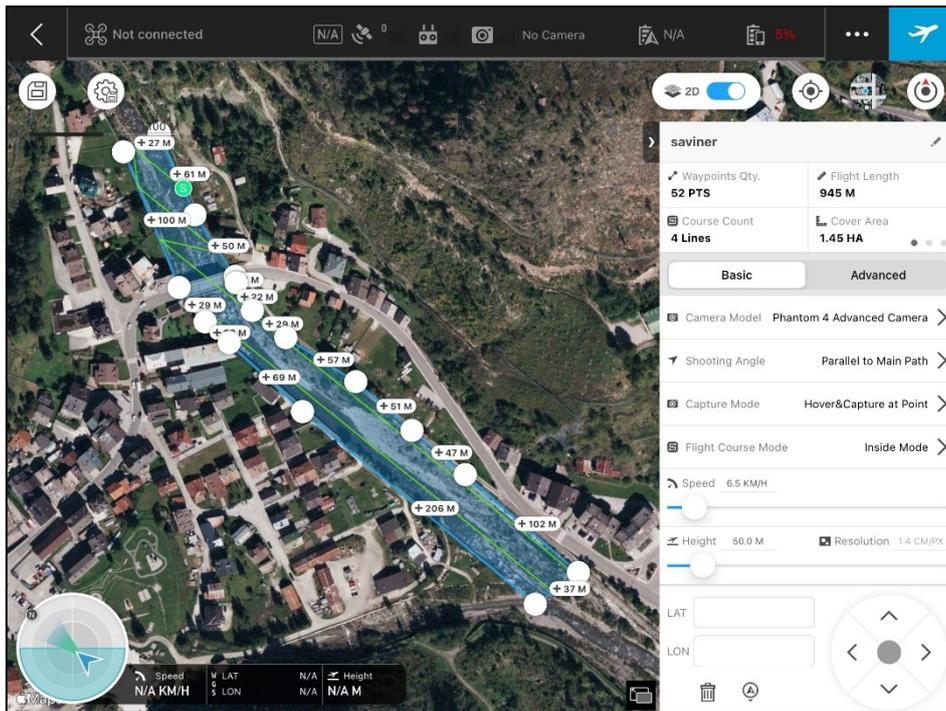


Figura 11: Piano di volo del drone per l'area studio di Saviner con a destra riportati alcuni parametri (Immagine da Martini L.).

Nel presente lavoro, tutte le successive elaborazioni dei dati spaziali sono state effettuate con il software open source QGis, nella versione *Long Time Release 3.34.5*.

4.4 Analisi morfologica

Per derivare le variazioni morfologiche si sono considerate principalmente le variazioni topografiche estrapolate dai due DEM prodotti come descritto nella sezione precedente (4.3). Nello specifico, sei sezioni trasversali sono state tracciate perpendicolarmente alla direzione del canale e disposte ad intervalli fissi di 50 metri, numerandole da 1 (monte) a 6 (valle). In corrispondenza di ciascuna sezione trasversale, si è ricavato il dato topografico da ciascuno dei due DEM (pre e post) tramite la funzione “*Terrain profile*”.

I dati riguardanti quota e posizione sono stati poi trasferiti su un foglio di calcolo, dove, dopo gli opportuni controlli sulla presenza di *outlier*, sono stati creati dei grafici a dispersione con linee (uno per ogni sezione), in modo da poter confrontare le variazioni altimetriche del profilo dell'alveo, effettuando un confronto tra i vari punti della sezione, aiutandosi con le due ortofoto.

4.5 Analisi del legname in alveo

Come per l'analisi topografica anche per quella del legname si è utilizzato il software QGis, sfruttando principalmente le 2 ortofoto (pre e post eventi) ricavate in precedenza. Per ogni ortofoto, si è mappato tutto il materiale legnoso classificabile come *large wood* (minimo 1m in lunghezza e 10cm in diametro). In particolare, si è distinto tra elementi singoli o accumuli (almeno un elemento di *large wood* in accumulo con altro materiale legnoso; Gurnell et al., 2013). Per tutti gli elementi sono state riportate all'interno della tabella attributi di QGis, le misure di lunghezza (l) e diametro (d). I dati ricavati sono poi stati trasferiti in un foglio di calcolo, dove si è proceduto prima all'individuazione della numerosità di elementi singoli ed accumuli e successivamente alla determinazione del volume di ogni elemento singolo o facente parte di accumuli, utilizzando la formula per il calcolo del volume del cilindro.

$$V = \pi * \left(\frac{d^2}{4}\right) * l \quad (7)$$

Con i dati così a disposizione, sono stati realizzati dei box plot rappresentanti valore minimo, 1° quartile, mediana, 3° quartile e valore massimo di lunghezza, diametro e volume, mettendo a confronto elementi singoli, negli accumuli e totale pre e post eventi.

Le misure di lunghezza, diametro e volume, sono state inoltre confrontate statisticamente attraverso i seguenti test ad hoc:

- T-Test, test parametrico per serie di dati con distribuzione normale, facendo attenzione alla varianza se simile o dissimile tra i due campioni;
- U-test di Mann-Whitney, test non parametrico per le serie di dati con distribuzione non normale.

Entrambi i test, con l'accettazione dell'ipotesi nulla ($p\text{-value} > 0,05$), affermano che i due campioni confrontati possono essere definibili, come derivanti dallo stesso popolamento e che quindi sono simili. Nel caso contrario si conclude che i due campioni non sono simili e pertanto il materiale legnoso rilevato post eventi, differisce significativamente da quello presenti in precedenza, con la possibilità quindi che derivi da una diversa area sorgente.

5. Risultati

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dalle elaborazioni descritte alla sezione 4.

5.1 Idrologia

Come visibile in *figura 12.1*, nel periodo 14/10/23-16/11/2023, si sono verificate cinque variazioni di portata, associate ad eventi di precipitazione di diversa intensità. Nota la portata idrica corrispondente al livello a piene rive associato all'area studio, pari a $20\text{m}^3/\text{s}$ è stato possibile escludere i primi tre eventi, aventi picchi rispettivamente pari a $12,74\text{m}^3/\text{s}$, $6,40\text{m}^3/\text{s}$ e $9,56\text{m}^3/\text{s}$; sono state invece confermate come eventi di piena la seconda e la terza variazione, con portate massime di $44,25\text{m}^3/\text{s}$ e $24,72\text{m}^3/\text{s}$.

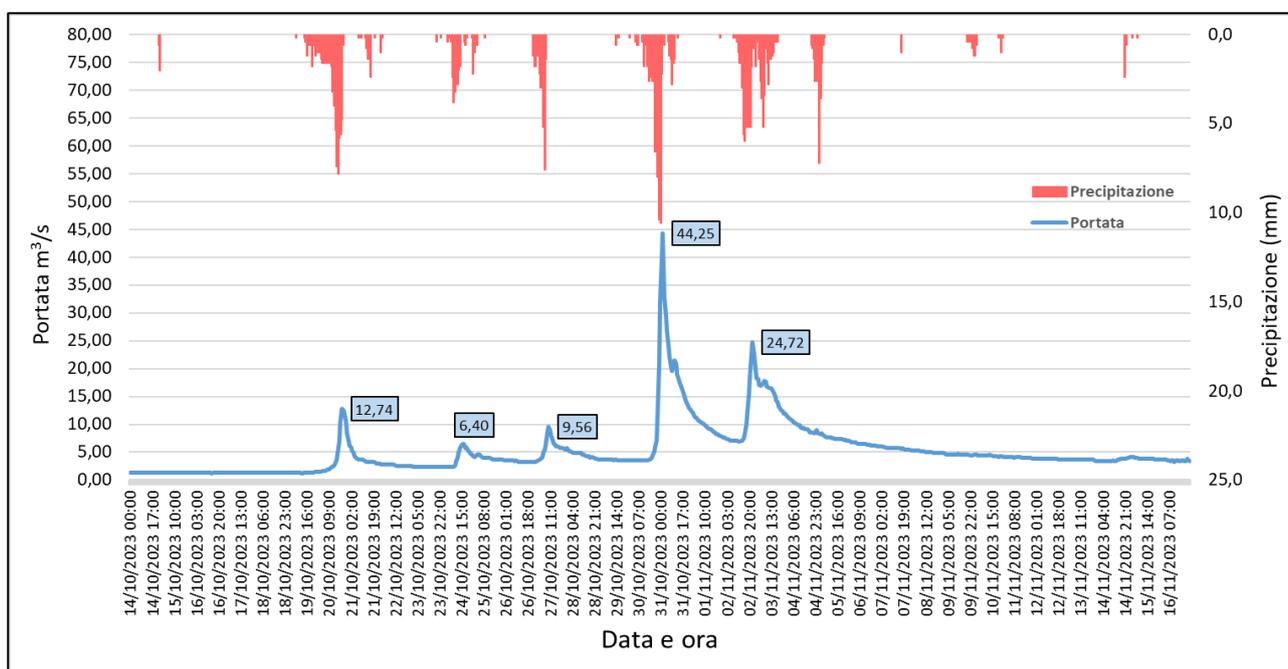


Figura 12.1: Idrogramma di piena ed istogramma delle precipitazioni, per il periodo 14/10/2023-16/11/2023.

Di seguito vengono riportati nel dettaglio i due eventi di piena che hanno superato il livello a piene rive.

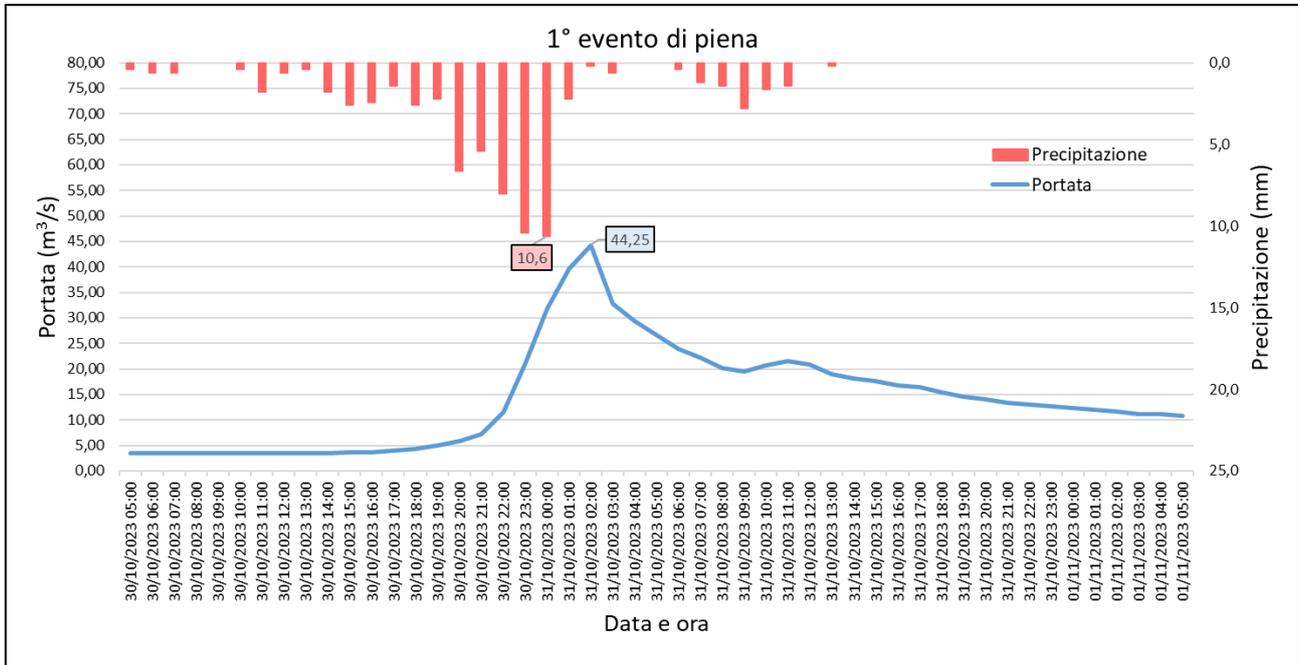


Figura 12.2 : Idrogramma del primo evento di piena e relativo istogramma delle precipitazioni.

Tabella 2.1: Data di inizio e fine, portata massima, precipitazione cumulata ed intensità massima relative al primo evento di piena.

Inizio evento	Fine evento	Portata max (m³/s)	Precipitazione tot.(mm)	Intensità massima (mm/h)
30/10/2023 10:00	02/11/2023 12:00	44,25	70,8	10,6

In figura 12.2 e tabella 2.1 viene rappresentato il primo e più importante evento di piena in un intervallo temporale di 48h. Durante questo evento, la precipitazione cumulata è stata di 70,8 mm con un massimo di 10,6 mm/h, mentre la portata liquida è passata da 3,47m³/s il 30/10/2023 alle ore 14:00 (risultato degli eventi minori precedenti), ad un massimo di 44,25 m³/s il 31/10/2023 alle ore 02:00, superando di oltre 24m³/s la soglia di portata a piene rive. Dopo il picco, la portata è gradualmente calata, fino a raggiungere i 6,85m³/s il 02/11/2023 alle ore 12:00. Durante questo evento, la portata è stata superiore al livello a piene rive per un tempo di 13h.

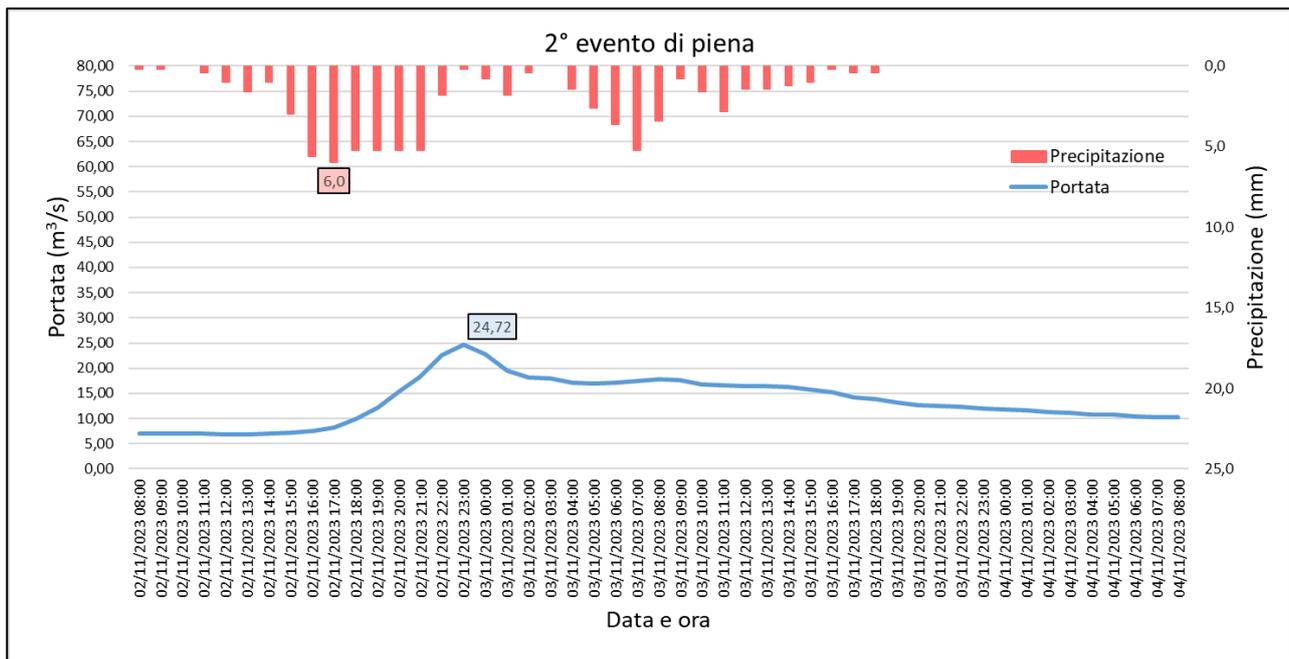


Figura 12.3: Idrogramma del secondo evento di piena e relativo istogramma delle precipitazioni.

Tabella 2.2: Data di inizio e fine, portata massima, precipitazione cumulata ed intensità massima relative al secondo evento di piena

Inizio evento	Fine evento	Portata max (m ³ /s)	Precipitazione tot.(mm)	Intensità massima (mm/h)
02/11/2023 14:00	03/11/2023 21:00	24,72	72,2	6,0

In figura 12.3 e tabella 2.2 viene rappresentato il secondo evento di piena in un intervallo temporale di 48h. Durante questo evento, la precipitazione è stata di 72,2 mm con un massimo di 6mm/h, mentre la portata liquida è passata da 6,85m³/s il 02/11/2023 alle ore 14:00 (risultato del precedente evento di piena), ad un massimo di 24,72m³/s il 02/11/2023 alle ore 23:00, superando di quasi 5 m³/s la soglia di portata a piene rive. Dopo il picco, la portata è calata in maniera molto più lenta rispetto all'evento precedente, a causa delle leggere precipitazioni che si sono protratte sino a fine giornata. Durante questo evento, la portata è stata superiore al livello a piene rive per un tempo di 3h.

5.2 Granulometria

Dalle analisi effettuate sulla granulometria è emerso che tutti i diametri caratteristici post eventi sono aumentati, specialmente il D₁₆, aumentato del 78,9% passando da 19mm a 34mm; inoltre, il D₅₀ (diametro mediano), è cresciuto del 51,1% passando da 47mm a 71mm, mentre il diametro medio D_m è passato da 53mm a 74mm aumentando del 39,6% (tabella 3).

Risultano invece diminuiti il D_{90} e il D_{95} che registrano una diminuzione rispettivamente di 38mm (14,3%) e 11mm (3,5%).

Inserendo i dati della *tabella 3* all'interno della classificazione dell'*American Geophysical Union*, si è osservato come il D_5 e il D_{16} siano passati da essere classificati come ghiaia fine a ghiaia media, il D_{50} da ghiaia molto grossa a ciottoli piccoli, il D_{90} da massi piccoli a ciottoli grossi.

Riguardo alla distribuzione granulometrica, i valori della deviazione standard (σ), sempre visibili in *tabella 3*, indicano che questa in entrambi i casi risulta eterogenea, con valori superiori ad 1,35.

Tabella 4: Diametri caratteristici e deviazione standard della distribuzione pre e post evento.

Dx (mm)	PRE	POST
D_5	13	21
D_{16}	19	34
D_{40}	35	58
D_{50}	47	71
D_{84}	158	172
D_{90}	265	227
D_{95}	317	306
D_m	53	74
Dev.st. (σ)	2,92	2,26

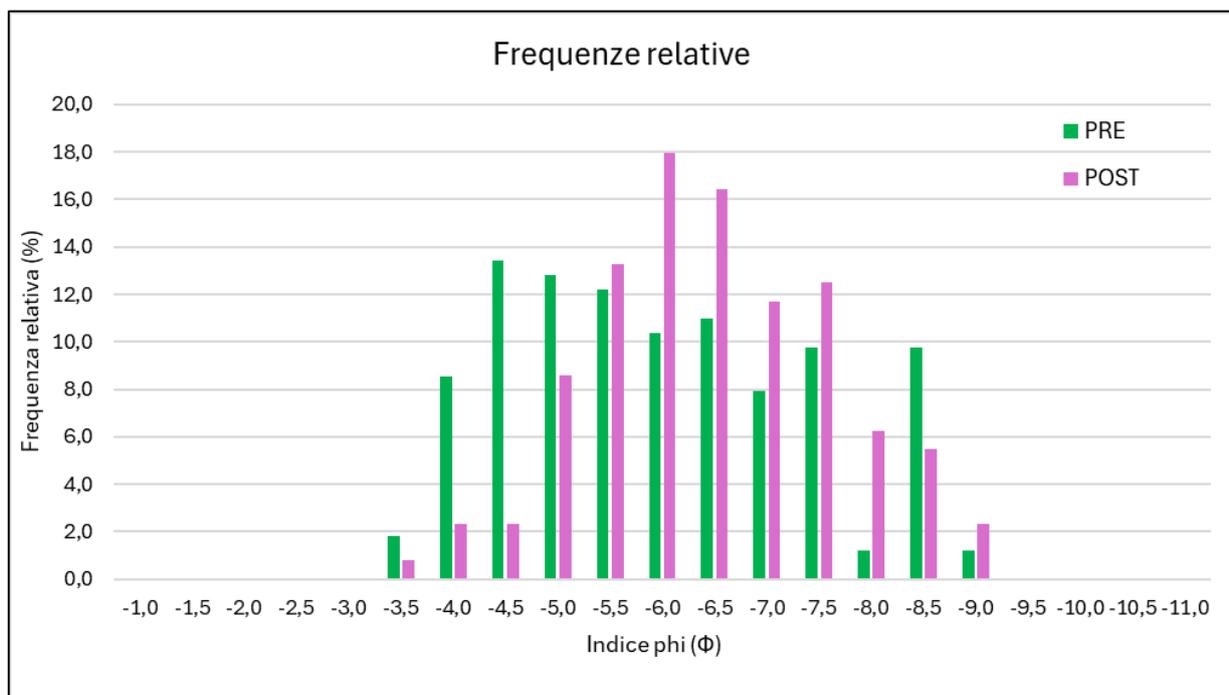


Figura 13.1: Distribuzione delle frequenze relative pre e post eventi.

Dalle varie frequenze relative delle classi di phi (Φ), riportate in *figura 13.1*, è possibile notare come in entrambi i casi, si registrino valori di Φ compresi tra -3,5 (ghiaia media) e -9,0 (massi piccoli), ma nel post eventi, tendano ad essere più frequenti i valori da -6,0 (ghiaia molto grossa) a -6,5 (ciottoli piccoli), a differenza del pre eventi, quando la distribuzione era sicuramente più eterogenea, con comunque una maggior frequenza nei Φ dal -4,5 al -5,5 (ghiaia grossa e ghiaia molto grossa).

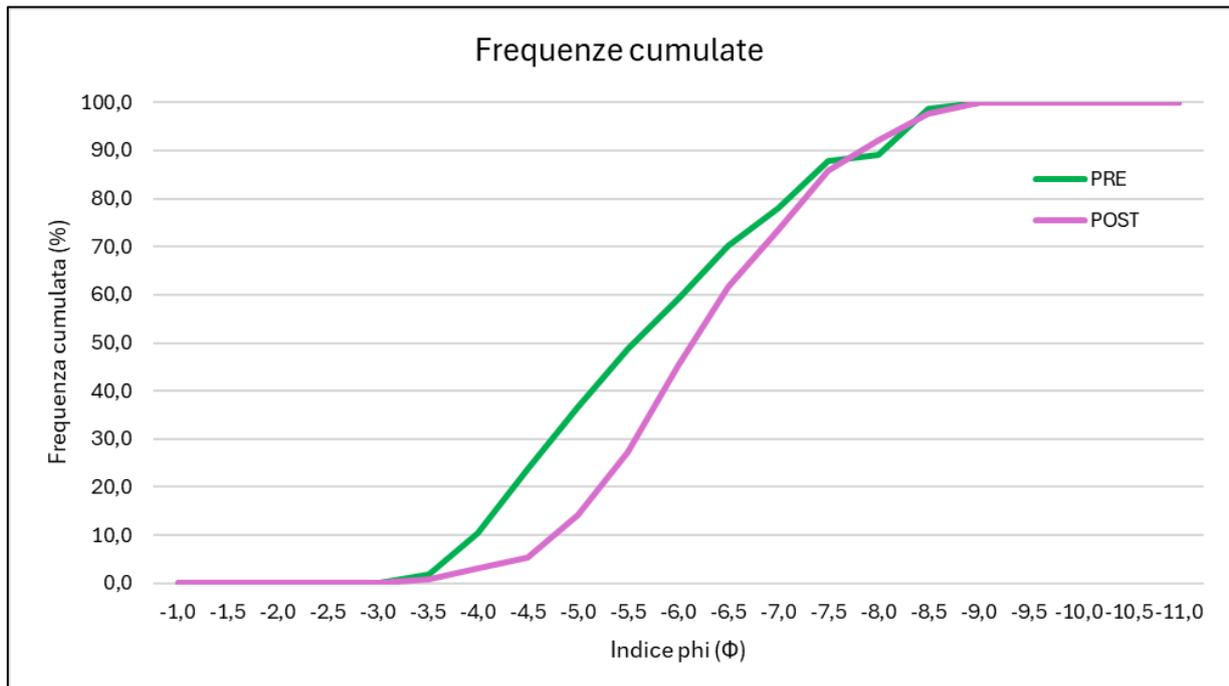


Figura 13.2: Frequenze cumulate pre e post eventi.

La distribuzione nelle varie classi di Φ è visibile anche dal grafico delle frequenze cumulate (*figura 13.2*), dove la curva post eventi risulta spostata verso destra, per un maggior numero di elementi nelle classi centrali, mentre spostandosi verso le ultime classi, le due curve tornano ad avvicinarsi, fino ad intersecarsi nel valore di $\Phi = -7,5$.

5.3 Morfologia

Nelle seguenti figure, vengono riportati i risultati delle analisi riguardanti le variazioni topografiche delle sezioni trasversali pre e post eventi; la rappresentazione delle varie sezioni avviene sempre dalla sinistra alla destra idrografica.

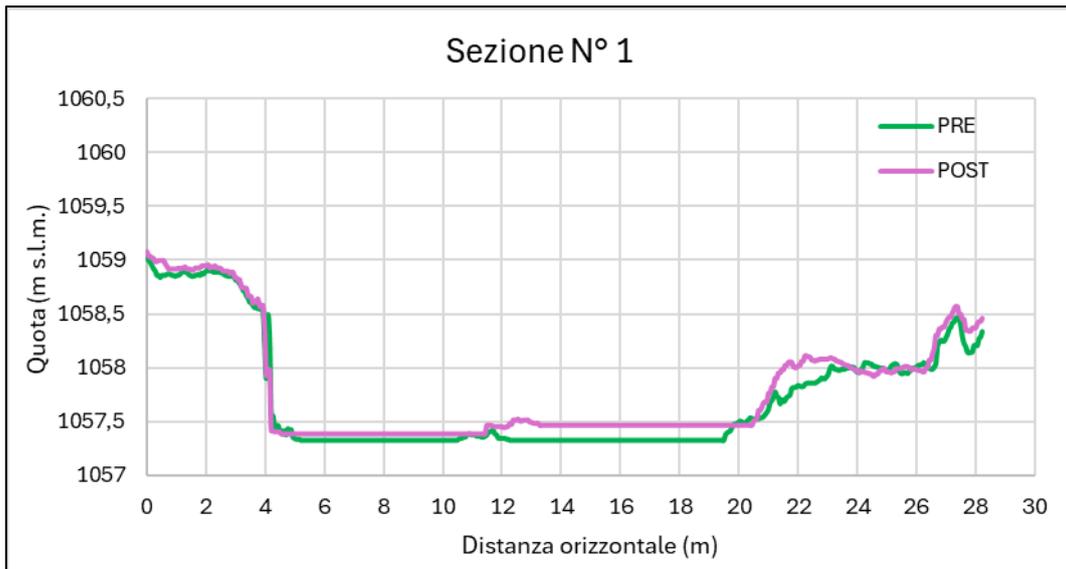


Figura 14.1: Profilo altimetrico della sezione numero 1, pre e post eventi.

In figura 14.1 è riportata la sezione numero 1, tracciata circa 7m a valle del ponte. Osservando i due profili e confrontandoli con le due ortofoto, si è notato che la scogliera in massi presente nei primi 4m è rimasta inalterata, successivamente dai 4m, fino ai 20m è presente il canale nel quale si sono verificati dei leggeri fenomeni di deposizione nella parte centrale (dai 10m ai 14m) ed infine oltre i 20 metri è presente una barra che ha subito anch'essa un innalzamento nella parte adiacente al canale.

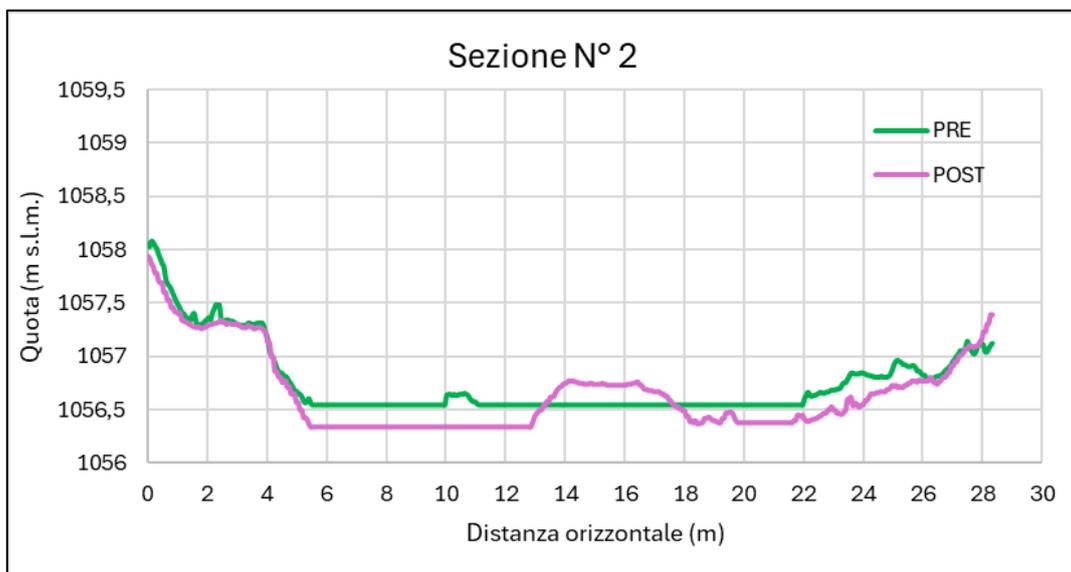


Figura 14.2: Profilo altimetrico della sezione numero 2, pre e post eventi.

In *figura 14.2* è riportata la sezione numero 2, dove si è osservato che anche in questo caso la scogliera presente nei primi 4 metri è rimasta inalterata, mentre dai 4m ai 12m è presente il canale che dopo gli eventi di piena ha subito un abbassamento, dai 12m ai 18m è poi presente una barra che risulta leggermente innalzata e che risalta nel post eventi anche a causa dell'abbassamento del tratto di canale dopo di essa, che va dai 18m ai 24m; ultimo tratto è quello che dal 24° metro, raggiunge il muro di sponda in cemento e che risulta anch'esso leggermente abbassato in seguito alle piene, fatta eccezione degli ultimi 2 metri costituiti da materiale di dimensioni maggiori e rimasti pressoché inalterati.

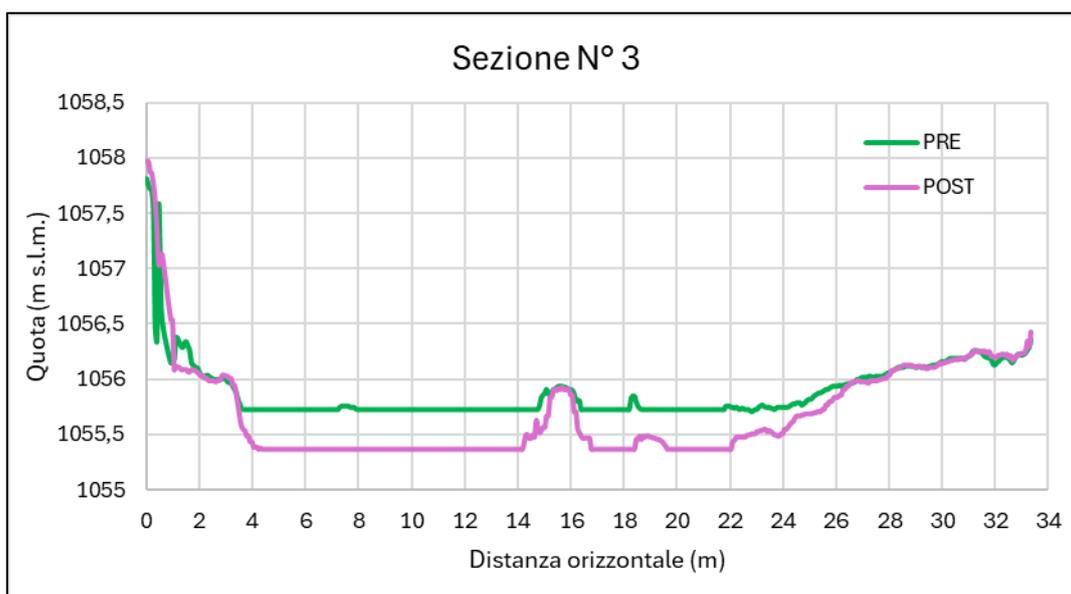


Figura 14.3: Profilo altimetrico della sezione numero 3, pre e post eventi.

In *figura 14.3* è riportata la sezione numero 3, dove per i primi 3m costituiti dalla scogliera in massi, non sono state osservate particolari variazioni, che sono state riscontrate invece nel canale che va dai 3m fino ai 15-16m dove un masso di discrete dimensioni ha mantenuto l'esatta posizione che aveva prima delle piene. Dai 16m fino 24m continua ad esserci un leggero passaggio d'acqua favorito dall'ulteriore scavo dell'alveo, che tende poi a rialzarsi fino a raggiungere il livello pre eventi nel tratto di barra che va dai 23m fino al muro di sponda.

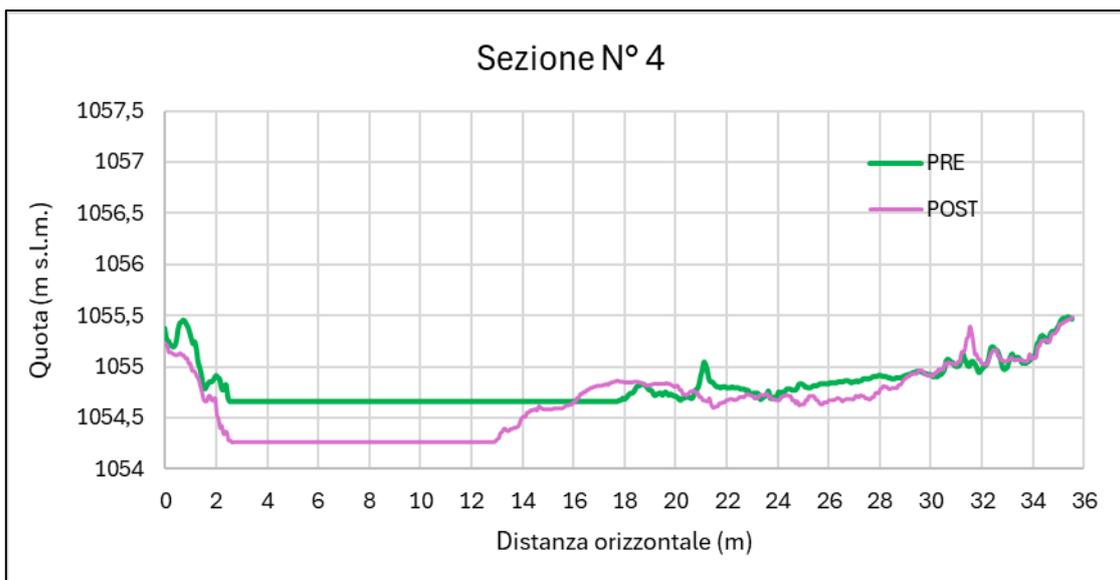


Figura 14.4: Profilo altimetrico della sezione numero 4, pre e post eventi.

In figura 14.4 è riportata la sezione numero 4, dove oltre i 2m l'alveo, è passato da avere prima degli eventi variazioni di altezza molto graduali e costanti, a successivamente presentare oscillazioni brusche e ripetute, infatti dai 2m ai 15m si è osservato un consistente abbassamento del canale, a fianco al quale, fenomeni di deposizione hanno originato una barra nel tratto tra i 13 e i 22 metri; nel tratto tra i 22 e i 29 metri, si è verificato un leggero scavo dell'alveo con la formazione di un canale secondario con scarsa presenza di acqua, mentre oltre i 29 metri, dove è presente materiale più grossolano, non sono stati riscontrati cambiamenti ad eccezione di un picco tra i 31m e i 32m dovuto però alla presenza di materiale legnoso.

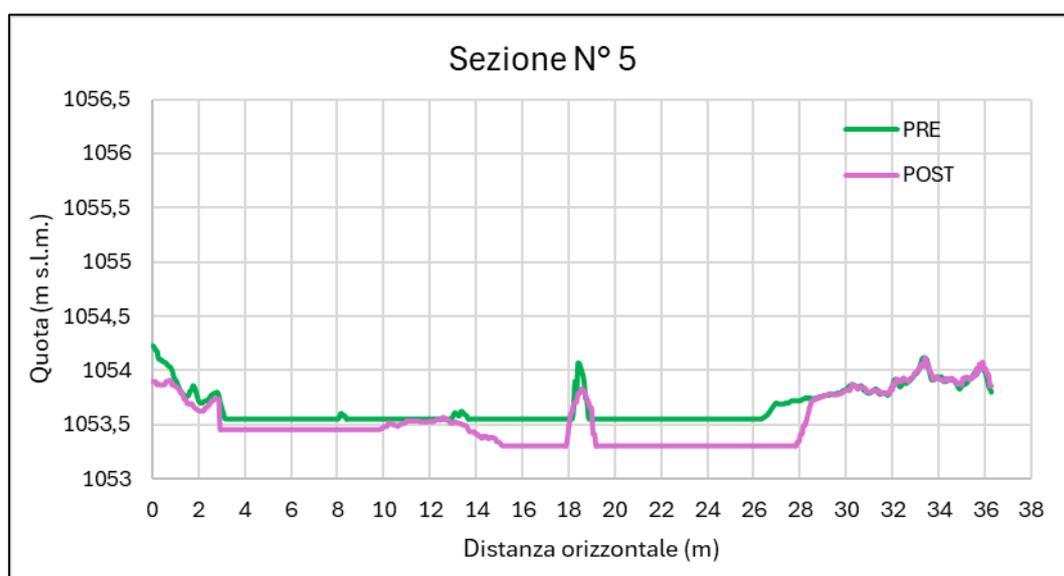


Figura 14.5: Profilo altimetrico della sezione numero 5, pre e post eventi.

In *figura 14.5* è riportata la sezione numero 5, dove post eventi, il canale che prima andava dai 3m ai 26m è stato diviso a causa dei fenomeni di deposizione che hanno innalzato leggermente l'alveo formando una barra che occupa il tratto dai 10m ai 15m; inoltre, nel tratto dopo la barra, i fenomeni erosivi hanno portato ad un abbassamento e allargamento del canale portandolo ad occupare la zona tra i 15m ed i 28m, mantenendo comunque inalterata la posizione di un masso situato in corrispondenza dei 18-19m. Dal termine del canale, fino al muro di sponda, dove il letto è costituito da materiale di dimensione maggiore, non sono stati rilevate alterazioni della morfologia.

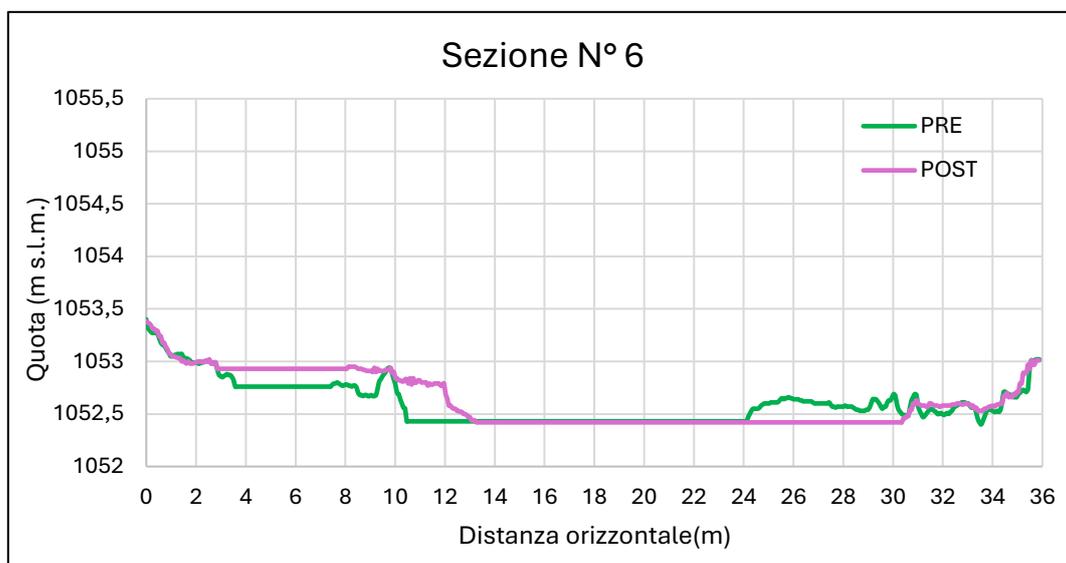


Figura 14.6: Profilo altimetrico della sezione numero 6, pre e post eventi.

In *figura 14.6* è riportata la sezione numero 6, posta al termine del muro di sponda sulla destra idrografica. Come già osservato in quasi tutte le sezioni precedenti, la scogliera in massi che occupa i primi 3m non ha subito variazioni, a differenza del fondo del canale adiacente, il quale ha subito un innalzamento che ha portato inoltre allo sviluppo di una barra (già in parte presente prima delle piene) che si estende dall' 8°, fino al 12° metro. Il canale principale, che prima degli eventi di piena era situato tra gli 11m e i 24m, ha subito un leggero spostamento verso destra ed un ampliamento, che lo hanno portato a collocarsi tra i 13m e i 31m. Oltre i 31m, fino al muro di sponda l'alveo, costituito da materiale più grossolano tra cui massi di discrete dimensioni, non ha subito particolari variazioni.

5.4 Legname in alveo

L'osservazione delle ortofoto derivanti dai rilievi aerei ha portato all'individuazione di 17 elementi singoli di *large wood* pre eventi e 31 post eventi, mentre per quanto riguarda gli accumuli, ne sono stati rilevati 7 pre eventi e 23 post eventi, con in entrambi i casi, una media di 2 elementi per accumulo.

Dalle analisi effettuate è risultato inoltre che il volume totale di legname prima delle piene era di 1,560m³, mentre post eventi, è stato di oltre 5 volte superiore con un valore di 9,541m³.

Tabella 4: Numero degli elementi legnosi singoli, degli elementi negli accumuli e volume.

	Legname in alveo	
	PRE	POST
Singoli (N°)	17	31
Accumuli (N°)	7	23
Volume (m ³)	1,560	9,541

5.4.1 Elementi singoli

I risultati riguardanti lunghezza, diametro e volume degli elementi singoli vengono riportati rispettivamente in *tabella 5.1* e *figura 15.1*, *tabella 5.2* e *figura 15.2*, *tabella 5.3* e *figura 15.3*.

Tabella 5.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi singoli, più risultato dell'U-test.

	Lunghezza singoli (m)	
	PRE	POST
Minimo	1,00	1,00
1° quartile	1,29	1,40
Mediana	1,54	1,85
3° quartile	2,15	2,80
Massimo	4,10	10,00
U-test	p-value	
	0,1312	

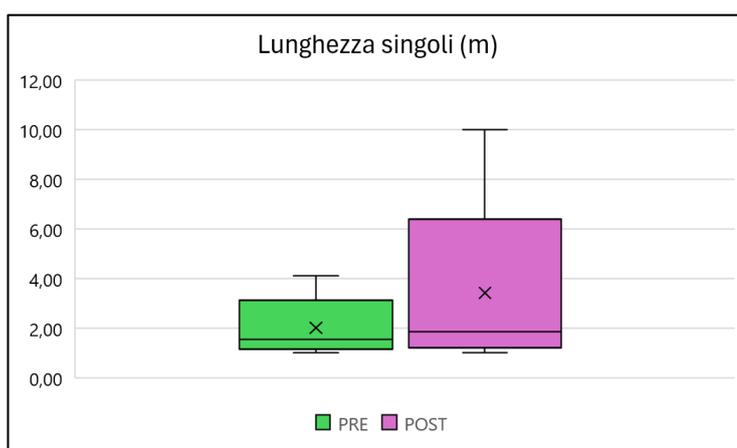


Figura 15.1: Box plot delle lunghezze degli elementi singoli pre e post eventi.

Comparando le lunghezze degli elementi singoli (*tabella 5.1* e *figura 15.1*), è risultato che il legname pre eventi ha raggiunto massimi di 4,10m, meno della metà rispetto al massimo post eventi

corrispondente a 10m; questa differenza non è rispecchiata dalle mediane dei due gruppi, pari a 1,54m pre eventi e 1,85m post eventi (0,31m in più). Il risultato dell'U-Test è stato 0,1312, valore maggiore del limite di 0,05 che ha portato all'accettazione dell'ipotesi nulla, ovvero che i due gruppi non presentano una differenza significativa tra di loro.

Tabella 5.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi singoli, più risultato dell'U-test

	Diametro singoli (m)	
	PRE	POST
Minimo	0,1	0,1
1° quartile	0,14	0,12
Mediana	0,17	0,17
3° quartile	0,2	0,24
Massimo	0,45	0,43
U-test	p-value	
	0,8712	

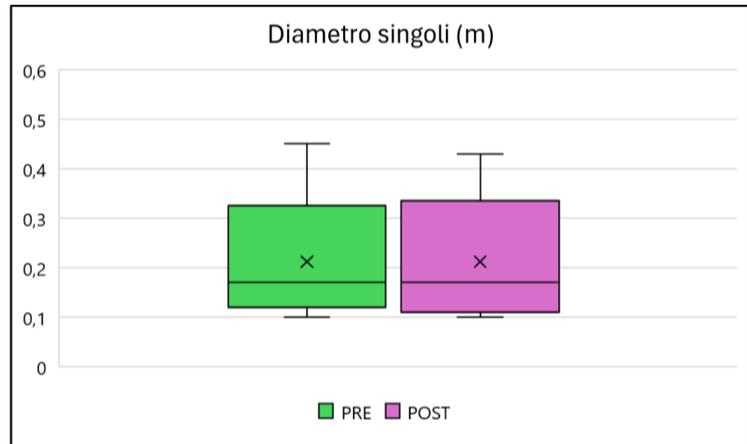


Figura 15.2: Box plot dei diametri degli elementi singoli pre e post eventi.

I due gruppi sono poi stati confrontati dal punto di vista dei diametri (tabella 5.2 e figura 15.2) che non hanno registrato particolari variazioni tra pre e post eventi, in quanto il diametro massimo pre eventi è stato di 0,45m, mentre post eventi 0,43m (0,02m in meno rispetto al pre eventi) con una mediana che in entrambi i casi è stata pari a 0,17m; inoltre, il risultato dell'U-Test, è stato un p value di 0,8712 che ha confermato la somiglianza tra i due gruppi.

Tabella 5.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi singoli, più risultato dell'U-test.

	Volume singoli (m ³)	
	PRE	POST
Minimo	0,010	0,010
1° quartile	0,023	0,025
Mediana	0,030	0,043
3° quartile	0,075	0,099
Massimo	0,272	1,452
U-test	p-value	
	0,4005	

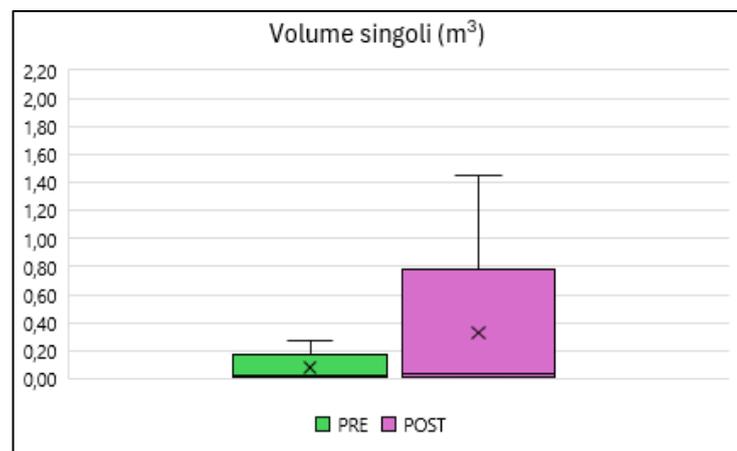


Figura 15.3: Box plot del volume degli elementi singoli pre e post eventi.

Dal confronto effettuato tra i volumi dei singoli elementi (*tabella 5.3 e figura 15.3*), si è osservato che pre eventi, il valore massimo raggiunto è stato di $0,272\text{m}^3$, mentre post eventi di $1,452\text{m}^3$, il 434% in più ($1,18\text{m}^3$); come per i diametri, questa spiccata differenza dei valori massimi, non è rispecchiata dalle mediane dei due gruppi che risultano essere $0,030\text{m}^3$ pre eventi e $0,043\text{m}^3$ post eventi, il 43% in più ($0,013\text{m}^3$). L'U test applicato, ha restituito un p-value di 0,4005, confermando anche questa volta la somiglianza tra i due gruppi.

5.4.2 Accumuli

I risultati riguardanti lunghezza, diametro e volume degli elementi presenti negli accumuli, vengono riportati rispettivamente in *tabella 6.1 e figura 16.1*, *tabella 6.2 e figura 16.2*, *tabella 6.3 e figura 16.3*.

Tabella 6.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test.

	Lunghezza accumuli (m)	
	PRE	POST
Minimo	1,00	1,00
1° quartile	1,31	1,18
Mediana	2,19	1,83
3° quartile	3,40	2,57
Massimo	5,26	8,66
U-Test	p-value	
	0,3863	

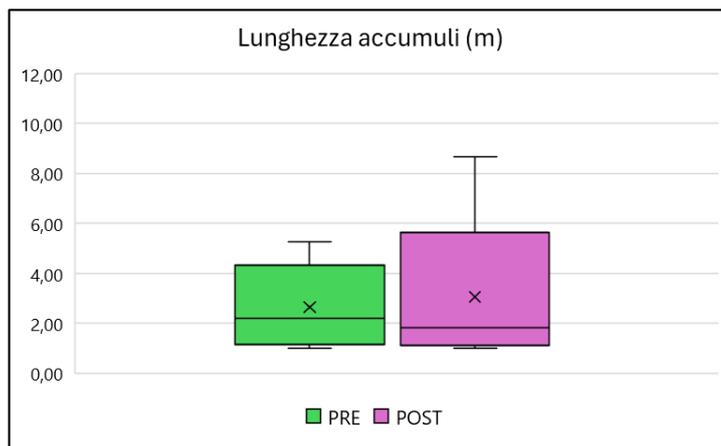


Figura 16.1: Nox plot delle lunghezze degli elementi negli accumuli pre e post eventi.

Dal confronto delle lunghezze degli elementi costituenti gli accumuli (*tabella 6.1 e figura 16.1*), è risultato che il legname post eventi ha raggiunto un massimo di 8,66m rispetto al massimo pre eventi di 5,26m, il 65% in più (3,4m); le mediane presentano invece delle differenze in senso opposto, con un valore pre eventi di 2,19m e post eventi 1,83m (0,36m in meno). L'U-test, ha restituito un p-value di 0,3863 dimostrando quindi che i 2 gruppi sono simili.

Tabella 6.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test.

	Diametro accumuli (m)	
	PRE	POST
Minimo	0,10	0,10
1° quartile	0,10	0,12
Mediana	0,15	0,17
3° quartile	0,18	0,22
Massimo	0,26	0,57
U-test	p-value	
	0,18320	

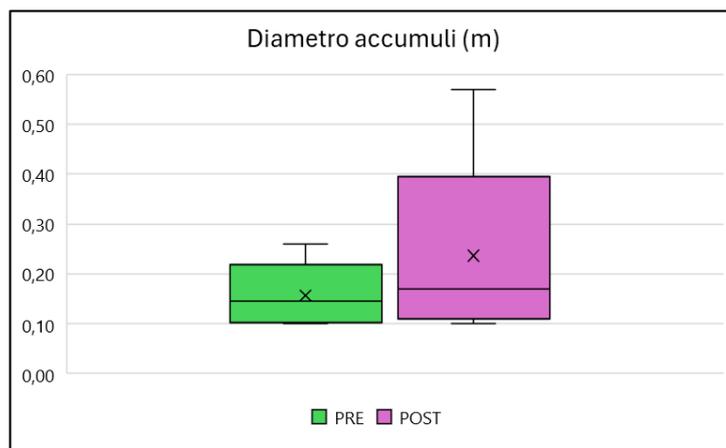


Figura 16.2: Box plot dei diametri degli elementi negli accumuli pre e post eventi.

I diametri degli elementi costituenti gli accumuli (tabella 6.2 e figura 16.2), hanno registrato valori massimi di 0,26m pre eventi e 0,57m post eventi (0,31m in più) con delle mediane rispettivamente di 0,15 e 0,17m (0,02m in più); inoltre, l'U-Test ha restituito un p-value di 0,18320, superiore al limite di accettazione dell'ipotesi nulla, ovvero che i due gruppi sono statisticamente simili.

Tabella 6.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi negli accumuli, più risultato dell'U-test.

	Volume accumuli (m ³)	
	PRE	POST
Minimo	0,019	0,010
1° quartile	0,025	0,026
Mediana	0,053	0,075
3° quartile	0,158	0,180
Massimo	0,224	1,982
U-Test	p-value	
	0,5563	

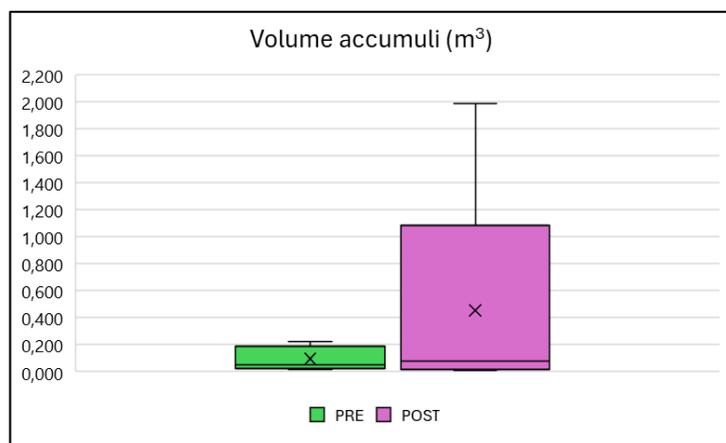


Figura 16.3: Box plot del volume degli elementi negli accumuli pre e post eventi.

Dal confronto dei volumi (tabella 6.3 e figura 16.3) sono stati riportati un valore massimo pre eventi di 0,224m³, mentre post eventi di 1,982m³, il 785% in più (1,758m³); la mediana nei due casi è di 0,053m³ nel pre e 0,075m³ nel post, con un aumento del 42% (0,022m³). L'applicazione dell'U test, ha restituito un p-value di 0,5563, confermando la somiglianza statistica tra i due gruppi.

5.4.3 Legname totale

I risultati riguardanti lunghezza, diametro e volume della totalità del legname, vengono riportati rispettivamente in *tabella 7.1* e *figura 17.1*, *tabella 7.2* e *figura 17.2*, *tabella 7.3* e *figura 17.3*.

Considerando la totalità del materiale legnoso, valori massimi e minimi derivano dalla tipologia di elementi precedentemente analizzata, mentre sono osservabili delle variazioni per quanto riguarda i valori mediani.

Tabella 7.1: Dati relativi ai box plot della lunghezza degli elementi totali, più risultato dell'U-test.

	Lunghezza totale (m)	
	PRE	POST
Minimo	1,00	1,00
1° quartile	1,29	1,29
Mediana	1,71	1,84
3° quartile	2,74	2,63
Massimo	5,26	10,00
U-test	p-value	
	0,752441	

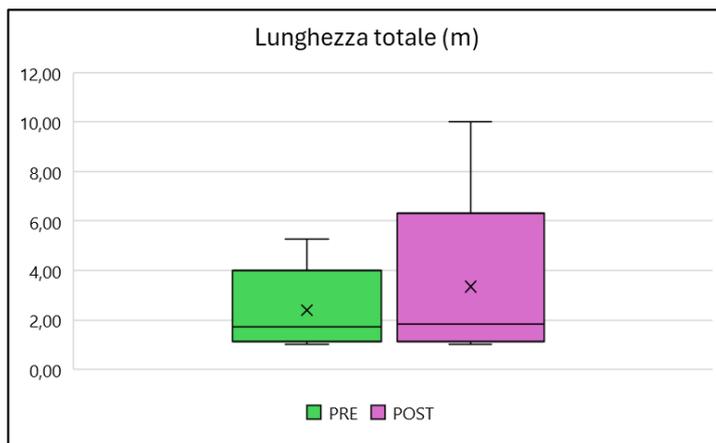


Figura 17.1: Box plot delle lunghezze degli elementi totali pre e post eventi.

Le lunghezze mediane pre eventi (*tabella 7.1* e *figura 17.1*) sono di 1,71m, mentre post eventi 1,84, 0,13m in più; inoltre, l'U-test il quale ha riportato un p-value di 0,752441 che conferma la somiglianza tra i due gruppi.

Tabella 7.2: Dati relativi ai box plot del diametro degli elementi totali, più risultato

	Diametro totale (m)	
	PRE	POST
Minimo	0,10	0,10
1° quartile	0,12	0,12
Mediana	0,17	0,17
3° quartile	0,19	0,23
Massimo	0,45	0,57
U-test	p-value	
	0,4091	

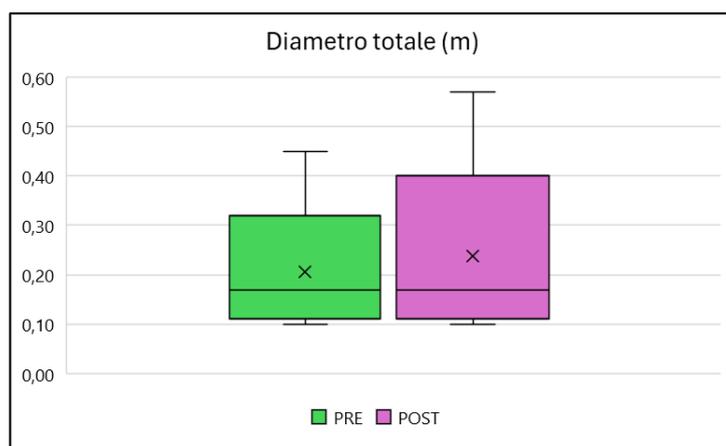


Figura 17.2: Box plot dei diametri degli elementi totali pre e post eventi.

I diametri mediani pre e post eventi (*tabella 7.2* e *figura 17.2*) coincidono e sono pari a 0,17m. La somiglianza è inoltre confermata dall'U test, che ha restituito un p-value di 0,4091.

Tabella 7.3: Dati relativi ai box plot del volume degli elementi totali, più risultato dell'U-test.

	Volume totale (m ³)	
	PRE	POST
Minimo	0,010	0,010
1° quartile	0,024	0,025
Mediana	0,036	0,050
3° quartile	0,076	0,110
Massimo	0,272	1,982
U-test	p-value	
	0,3627	

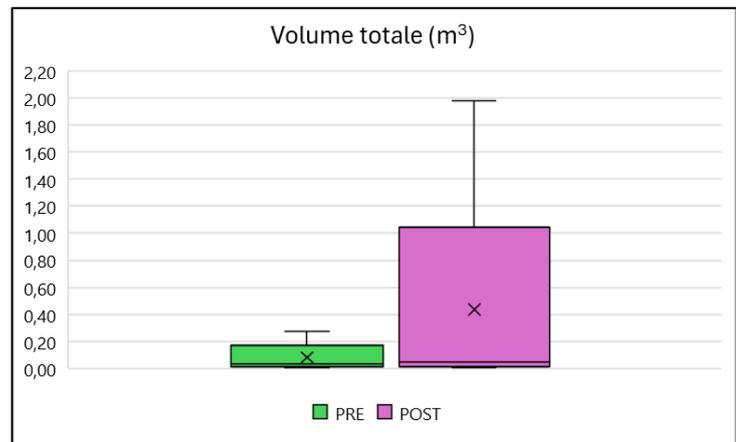


Figura 17.3: Box plot del volume degli elementi totali pre e post eventi.

Confrontando infine il volume (tabella 7.3 e figura 17.3), sono stati riscontrati valori mediani pre e post eventi rispettivamente di 0,036m³ e 0,050m³, il 39% in più (0,014m³). Nonostante la differenza riscontrata, i due popolamenti possono essere considerati come derivanti dallo stesso popolamento, in quanto l'U test effettuato, ha prodotto un p-value di 0,3627 confermando l'ipotesi nulla.

6. Discussioni

Le analisi, effettuate su una varietà di dati derivanti da differenti metodologie di rilievo, hanno permesso di sviluppare un quadro conoscitivo abbastanza ampio sugli effetti di una piena in un torrente montano.

In particolare, valutando gli aspetti idrologici, si è compreso che le precipitazioni verificatesi a cavallo tra ottobre e novembre 2023, non hanno generato un unico evento di piena, ma bensì due eventi significativi, distanziati di poche ore uno dall'altro e accompagnati prima e durante da altre oscillazioni della portata che però non hanno mai superato il limite di piene rive pari a $20\text{m}^3/\text{s}$. La prima piena, derivante da una precipitazione di 70,8 mm in 33 ore con un massimo di 10,6 mm/h, è stata la più intensa con una portata che ha raggiunto i $44,25\text{m}^3/\text{s}$ superando del doppio il livello di piene rive. La seconda, derivante da una precipitazione di 72,2 mm (quindi maggiore rispetto alla prima) distribuita in 35 ore, con un massimo di 6,0mm/ora, ha invece avuto una portata massima di $24,72\text{m}^3/\text{s}$, valore di poco superiore al livello di piene rive. Nonostante i due eventi siano stati caratterizzati da precipitazioni cumulate del tutto simili, il primo è risultato nettamente più intenso in quanto, oltre la metà della precipitazione è stata concentrata in un periodo di sei ore, andando ad alimentare rapidamente la rete idrografica superficiale; al contrario di quanto accaduto per il secondo evento, che invece deriva da una precipitazione più distribuita nel tempo, con un'intensità massima oraria quasi dimezzata rispetto al precedente. La precipitazione così distribuita nel tempo, potrebbe giustificare il picco di portata più basso e la lentezza nel tornare ai livelli di magra; inoltre, va evidenziato il fatto che il secondo evento è iniziato con una situazione di portata derivante da quello che era il braccio discendente del primo evento ($6,85\text{m}^3/\text{s}$), condizione, che unita a quella di probabile maggior deflusso superficiale, a causa della minor capacità di assorbimento del terreno dovuta alle precipitazioni dei giorni precedenti, ha sicuramente facilitato il superamento della portata a piene rive (Penna et al., 2011; Marchi et al., 2010).

Considerando la variazione granulometrica del sedimento, i risultati hanno mostrato una generale diminuzione degli elementi più fini come la ghiaia media e grossa, in favore di più grossolani come ghiaia molto grossa e ciottoli piccoli. Ciò è stato indicato anche dall'aumento significativo (>50%) dei diametri caratteristici dal D_5 al D_{50} . Per gli elementi più grandi invece, quali massi da piccoli a medi, si osservano delle oscillazioni con una riduzione contenuta (<20%) dei diametri caratteristici D_{90} e D_{95} . Queste osservazioni potrebbero dimostrare che gli eventi verificatisi, abbiano avuto abbastanza energia per trasportare gli elementi più fini, in accordo con Phillips (2002), ma non sufficiente per innescare il trasporto di elementi più grossolani anche dalle zone più a monte.

Per quanto riguarda le analisi derivanti dai rilievi aerei, queste sono state effettuate utilizzando DEM ed ortofoto con risoluzioni diverse (tabella 8).

Tabella8:Risoluzione di DEM ed ortofoto realizzati a luglio e novembre 2023.

Cella DEM (m)		Cella ortofoto (m)	
Luglio	Novembre	Luglio	Novembre
0,05	0,10	0,02	0,02

Prestando attenzione alle differenti risoluzioni durante le analisi, è stata valutata la morfologia, rilevando principalmente fenomeni erosivi, mentre i fenomeni di deposizione sono stati osservati con un'intensità minore; in ogni caso, le variazioni lungo l'asse verticale causate da questi processi, non superano mai il metro.

Osservando l'alveo post eventi, si è notato come nella prima sezione si siano verificati fenomeni di leggero deposito abbastanza generalizzato, mentre dalla seconda alla sesta sezione l'effetto delle piene sia stato più marcato, con l'erosione del fondo del canale già esistente; in particolare dalla seconda alla quarta, è stato abbassato il canale concentrato sulla sinistra idrografica e che precedentemente si estendeva fino a centro alveo, dove i fenomeni di deposizione hanno innalzato il letto, facendo emergere una barra. Si è così andato a formare un canale secondario sulla parte di centro-destra, che risulta però quasi del tutto asciutto nella sezione numero 4, a causa del passaggio dell'acqua in diversi punti verso il canale in sinistra.

Nella quinta e sesta sezione, la situazione è differente in quanto prima degli eventi il canale principale si trovava nella zona centrale dell'alveo, con a sinistra (a ridosso della scogliera che costeggia il muro), separato da una piccola barra, un canale minore, quest'ultimo nel post eventi si ritrova innalzato con la barra adiacente di dimensioni maggiori, mentre il canale principale, è stato allargato ed abbassato solo nella quinta.

In tutte le sezioni analizzate le porzioni di alveo adiacenti ai muri di sponda, costituite da materiale visivamente più grossolano (a sinistra è presente una scogliera in massi) rispetto al resto dell'alveo, non ha subito particolari variazioni.

Gli effetti riportati sono una tipica risposta di un alveo fluviale ad un evento di piena (Magilliga, 2015), anche se con un'intensità sicuramente limitata rispetto a quella riscontrata durante eventi estremi; inoltre, il fatto che le variazioni morfologiche siano contenute (< 1m in altezza e <3,5m in larghezza) suggerisce che il trasporto durante gli eventi sia stato prevalentemente di tipo liquido;

infatti, un trasporto di tipo solido avrebbe probabilmente causato alterazioni molto più importanti (Brenna, 2023), anche dal punto di vista granulometrico.

Le ultime analisi effettuate sono quelle riguardanti il legname, che hanno evidenziato come in seguito agli eventi di piena, il volume del *large wood* sia aumentato in maniera significativa (+ 511%); processo sicuramente facilitato dall'abbondante copertura forestale del bacino dell'alto Cordevole e dall'alta disponibilità di legname abbattuto e pronto per essere reclutato, derivante dall'evento Vaia del 2018 (Pellegrini et al. 2021).

I risultati hanno mostrato come la maggior parte del legname sia presente sotto forma di elementi singoli, piuttosto che di accumuli, con dimensioni che restano però sostanzialmente identiche dal punto di vista dei diametri, sia per quanto riguarda il confronto tra pre e post eventi, che per quanto riguarda singoli ed accumuli. Per quanto riguarda la lunghezza, questa risulta superiore negli elementi presenti post eventi ed in particolare negli accumuli; ciò è probabilmente dovuto al fatto che elementi di maggior lunghezza sono più predisposti ad incastrarsi tra gli ostacoli fissi presenti in alveo e ad intercettare altro materiale bloccandolo a sua volta (Rinaldi, 2016). Conseguente alle differenze di lunghezza, c'è la differenza di volume, che è risultato sempre maggiore negli elementi post eventi, anche se mai superiore del 50% rispetto alla situazione precedente.

In generale il numero di accumuli di legname dipende dalle caratteristiche morfologiche del tratto, dalla presenza di accumuli già esistenti, dalla pendenza, e dal tirante idraulico. In particolare, nell'area studio le condizioni di pendenza e di tirante idraulico dopo il picco di piena, potrebbero aver facilitato la deposizione del materiale legnoso, il cui volume e dimensioni non sono comunque in ogni caso paragonabili con la larghezza dell'alveo e pertanto non risulta apportare un contributo rilevante alle variazioni morfologiche (Rinaldi, 2016; Abbe e Montgomery, 2003; Gurnell, 2003).

Il materiale rinvenuto in alveo sia prima che dopo gli eventi, è classificabile come trasportato (Abbe & Montgomery 2003), in quanto l'area studio è situata all'interno di un contesto altamente urbanizzato e privo di copertura forestale, che invece è fortemente presente nel resto del bacino, specialmente lungo i rami di ordine minore, circondati quasi esclusivamente da boschi di conifere da cui generalmente deriva legname dal basso peso specifico, che ne facilita la fluttuazione. Altra caratteristica associata al legname proveniente dalle conifere è l'elevata lunghezza, in questo caso poco riscontrata specialmente nel post eventi, in quanto la maggioranza degli elementi risulta di dimensioni contenute; pertanto si può ipotizzare che il materiale pre e post eventi consista in legname già fortemente degradato, ridotto in pezzi più piccoli da eventi precedenti o altri fattori. Dai test statistici effettuati su lunghezze diametri e volume dei vari elementi, è risultato come questi siano

tutti riconducibili alla stessa popolazione, e pertanto si può escludere la formazione di nuove aree sorgenti diverse da quelle preesistenti.

Molto importante è precisare il fatto che i due DEM utilizzati per l'analisi della morfologia e del legname, non riportano valori accurati della quota dei canali, in quanto, la fotogrammetria, sebbene riesca a fornire grazie agli algoritmi *Structure From Motion*, in grado di correggere la rifrazione, buoni risultati (comunque non esenti da errori) nel caso di acqua perfettamente limpida, (Woodget et al.,2015), nel caso di flussi turbolenti e ricchi di materiale in sospensione come nei torrenti montani, non consente di effettuare delle misurazioni accurate. Questa metodologia presenta, inoltre, delle problematiche legate alla vegetazione, in quanto non è in grado di oltrepassare le chiome degli alberi o degli arbusti, anche se ciò può essere limitato, sempre con l'utilizzo degli appositi software.

Il fenomeno appena descritto è stato notato prevalentemente durante i rilievi morfologici in due sezioni (4 e 5). Qui, le sponde presentano differente copertura vegetale dovuta al periodo in cui sono stati effettuati i rilievi (estate ed autunno) e questo ha causato delle differenze di quota che non rispecchiavano la situazione reale.

Le imprecisioni sopra descritte potrebbero essere contenute o evitate, adottando metodologie alternative, come i rilievi aerei di tipo LIDAR, in grado di penetrare la copertura vegetale del suolo, oppure effettuando rilievi batimetrici nei canali. Entrambi i metodi riportati, presentano un'efficacia maggiore, ma richiedono un maggior dispendio di risorse economiche e di tempo, a differenza dei rilievi di tipo fotogrammetrico che con un'attrezzatura relativamente economica (paragonata al costo dei sistemi LIDAR) ed in tempi ridotti, permettono di ottenere prodotti dall'ottima risoluzione e con errori comunque contenuti grazie ai software sopraccitati.

7. Conclusioni

I rilievi aerei, uniti a quelli diretti sul campo, hanno permesso di ottenere una visione d'insieme degli effetti derivanti da una serie di piene di moderata intensità che hanno coinvolto il bacino dell'alto Cordevole nel periodo a cavallo tra ottobre e novembre 2023. In particolare, si è osservata una generale diminuzione dei sedimenti medio-fini, con leggeri fenomeni di ampliamento del canale fluviale e ridotte deposizioni di materiale trasportato dalla corrente che si presume sia stata principalmente liquida. È stato analizzato anche il legname, elemento molto importante per l'ecologia fluviale, ma problematico negli ambienti antropizzati, che ha subito un aumento in volume di circa cinque volte, rispetto alle condizioni prima degli eventi di piena, senza però registrare variazioni significative in termini di dimensioni dei singoli elementi che sono risultate nella maggior parte dei casi contenute e non significativamente influenzanti la morfologia d'alveo. Analizzando le dimensioni del legname dal punto di vista statistico, si è giunti inoltre alla conclusione che con buona probabilità, il materiale risultate dagli eventi di piena, proviene dalle stesse aree sorgente presenti in precedenza.

I risultati di questo lavoro, sebbene riportino le classiche reazioni di un alveo fluviale ad una portata di piena, nel caso in esame, vanno ad implementare il quadro conoscitivo delle possibili variazioni che questo corso d'acqua può subire al verificarsi di tali eventi.

8. Bibliografia

- 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.
- Aulitzky H. (1973). Vorläufige Wildbachgefährlichkeits-Klassifikation für Schwemmkegel, 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Band IV, Teil 2, 81-113.
- Aulitzky H. (1982). Preliminary two-fold classification of torrents, *Mitteil. der Forst. Bundesversuchsanstalt, Wien*, Heft 144, 243-256.
- Biedenharn D.S., Thorne C.R., Soar P.J., Hey R.D., Watson C.C. (2001). Effective discharge calculation guide. *Int.J.Sediment Res.*, 16(4), 445 – 459.
- Bin A. (2019). Relatore: Picco L.; Correlatore: Rainato R., Lenzi M.A.. Tempesta Vaia nel bacino del Rio Cordon (BL): effetti su aree sorgenti di sedimento e alveo attivo. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Corso di laurea triennale in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio, Università degli studi di Padova.
- Braudrick, C. A., & Grant, G. E. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology*, 41(4), 263-283.
- Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Zaramella, M., & Surian, N. (2023). What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event. *Geomorphology*, 430, 108650.
- Comiti, F., Agostino, V. D., Moser, M., Lenzi, M. A., Bettella, F., Agnese, A. D., ... & Mazzorana, B. (2012, April). Preventing wood-related hazards in mountain basins: from wood load estimation to designing retention structures. In *12th Congress INTERPRAEVENT, Conf. Proceedings* (pp. 23-26).
- Comiti, F., Cadol, D., & Wohl, E. (2009). Regimi di flusso, morfologia del letto e resistenza al flusso in canali step-pool autoformati. *Water Resources Research*, 45 (4).
- D'Agostino, V., & Vianello, A. (2005). Identificazione morfodinamica del reticolo idrografico: integrazione fra rilievi di campo e tecniche GIS. In *Quaderni di Idronomia Montana* (Vol. 24, pp. 271-290). Editoriale Bios.
- Dallan E. (2023), Materiale didattico del corso di Idrologia e Sistemazioni Idraulico-Forestali, Corso di Laurea Tecnologie Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova
- Ferro V., 2002, La sistemazione dei bacini idrografici. Milano: McGraw-Hill, 2 edizione, pp. 2-35

- Ferro, V. (2013). *Elementi di idraulica e idrologia: per le scienze agrarie, ambientali e forestali*. McGraw-Hill.
- Gurnell A.M., Piégay H., Swanson F.J., Gregory S.V. (2003). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47, 601-619.
- Gurnell, A.M. (2013). Wood in fluvial systems. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 9, *Fluvial Geomorphology*, pp. 163–188.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: a new perspective*. Hodder Arnold, London.
- Lane E.W. (1955). Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120, 1-34
- Lenzi M.A., D’agostino V., Sonda D. (2000). Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti. Criteri metodologici ed esecutivi. Editoriale Bios, 208 pp.
- Lenzi M.A., Mao L., Comiti F. (2006). Effective discharge for sediment transport in a mountain river: computational approaches and geomorphic effectiveness. *Journal of Hydrology*, 326, 257-276.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, S. Francisco
- Magilligan, F. J., Buraas, E. M., & Renshaw, C. E. (2015). The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding. *Geomorphology*, 228, 175-188.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Caratterizzazione di selezionate inondazioni improvvise estreme in Europa e implicazioni per la gestione del rischio di inondazione. *Journal of Hydrology*, 394 (1-2), 118-133.
- Montgomery, D. R., Collins, B. D., Buffington, J. M., & Abbe, T. B. (2003). Geomorphic effects of wood in rivers. In *American Fisheries Society Symposium* (Vol. 37, pp. 21-47).
- Parker G., Klingeman P.C., Mclean D.G. (1982). Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 108 (HY4), 544-571.
- Pavan S., Vianello A., Cesca M., Saccardo I.; “Cordevole River Basin Monograph” (2011); SHARE.
- Pellegrini et al. (2021). The morphological response of the Tegnass alpine catchment (Northeast Italy) to a Large Infrequent Disturbance

- Penna, D., Tromp-van Meerveld, HJ, Gobbi, A., Borga, M., & Dalla Fontana, G. (2011). L'influenza dell'umidità del suolo sui processi di generazione del deflusso di soglia in un bacino idrografico alpino. *Hydrology and Earth System Sciences* , 15 (3), 689-702.
- Phillips, J. D. (2002). Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin. *Journal of Hydrology*, 269(3-4), 236-250.
- Rainato, R., Martini, L., Pellegrini, G., & Picco, L. (2021). Hydrological, geomorphic and sedimentological responses of an alpine basin to a severe weather event (Vaia storm). *Catena*, 207, 105600.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M. (2016): IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Versione aggiornata 2016 – ISPRA – Manuali e Linee Guida 131/2016. Roma, gennaio 2016.
- Rosso, R. (2004). Mappatura dell'indice di assorbimento e del massimo volume specifico di ritenzione potenziale del terreno. *Relazione Finale Progetto SHAKEUP-2, ARPA Lombardia*.
- Schumm S.A., Harvey M.D., Watson C.C. (1984). *Incised Channels: Initiation, Evolution, Dynamics, and Control*. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, 200 pp.
- Shields F.D. Jr., Copeland R.R., Klingeman P.C., Doyle M.W., Simon A. (2003). Design for stream restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 575-584.
- Simon A. (1989). A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surf. Process. Landforms* 14, 11-26.
- Simon A., Castro J. (2003). Measurement and analysis of alluvial channel form. In: Kondolf G.M. & Piégay H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, 291 - 322.
- Soccol, E. U., & Tessarollo, A. (2003). *Il rischio idraulico nell'abitato di Caprile* (Doctoral dissertation, Tesi del master in difesa del suolo e protezione civile. Università degli Studi di Padova).
- Taffarello N. (2013). Relatore: Lenzi M.A. Il monitoraggio del trasporto solido di fondo nel torrente Cordevole (BL, Italia) con l'utilizzo di traccianti radio passivi Correlatore: Rigon E. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli studi di Padova.
- Wolman M.G., Miller J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68, no.1, 54-74.
- Woodget, A. S., Carbonneau, P. E., Visser, F., & Maddock, I. P. (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*, 40(1), 47-64.

9. Sitografia

- <https://comunico.distrettoalpiorientali.it/osservatorio/bacino-del-piave/>