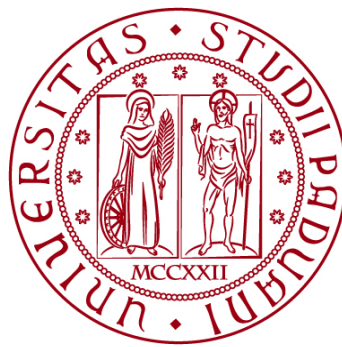


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea magistrale in Scienze della Natura



TESI DI LAUREA

**APPLICAZIONE DELLE FASCE FLUVIALI DI
DINAMICA MORFOLOGICA NEL BACINO DEL
TORRENTE CORDEVOLE**

**Relatore: Prof. Nicola Surian
Dipartimento di Geoscienze**

**Correlatore: Dott. Andrea Brenna
Dipartimento di Geoscienze**

Laureando: Giacomo Poletto

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

INDICE

ABSTRACT	6
RIASSUNTO	7
1.INTRODUZIONE	8
2.OBBIETTIVI	10
3.INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	11
3.1 IL TORRENTE CORDEVOLE	11
3.2 I TRIBUTARI DEL CORDEVOLE	12
4.LA TEMPESTA VAIA	13
5.MATERIALI E METODI	14
5.1 LE FASCE DI DINAMICA FLUVIALE	14
5.2 CONFRONTO FRA LE FASCE E GLI EFFETTI GEOMORFOLOGICI DI VAIA.....	22
5.3 FATTORI CHE INFLUENZANO L'ALLARGAMENTO PARTICOLARMENTE INTENSO DELL'ALVEO NEI TORRENTI MONTANI	25
6.RISULTATI	25
6.1 REALIZZAZIONE DELLE FASCE	25
6.2 RELAZIONI TRA DIMENSIONE DELL'ALVEO, PRE E POST-VAIA, E FASCE FLUVIALI.	30
6.3 CONFRONTO FRA LE FASCE E GLI ALLARGAMENTI MASSIMI CAUSATI DA VAIA.	34
6.4 FATTORI CHE INFLUENZANO GLI ALLARGAMENTI PIU' INTENSI.....	37
7.DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	48
8. APPENDICE	50
9.BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	55
RINGRAZIAMENTI	57

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Bacino idrografico del Torrente Cordevole	12
Fig. 2: Distribuzione delle precipitazioni nella parte di bacino del Cordevole considerata	13
Fig. 3: Esempi di digitalizzazione di alvei attivi.....	16
Fig. 4: Sovrapposizione progressiva dei vari alvei digitalizzati.....	17
Fig. 5: Settori dei corsi d'acqua considerati in questo lavoro.....	18
Fig. 6: Divisione in tratti del settore del Cordevole preso in considerazione.	19
Fig. 7: Divisione in tratti per i quattro tributari.....	20
Fig. 8: Esempio di misura dell'erosione necessaria al calcolo dei tassi di arretramento medi annui.....	21
Fig. 9: Esempio di misura dell'erosione necessaria al calcolo dei tassi di arretramento medi annui.....	22
Fig. 10: Esempio di misure effettuate per testare l'efficacia delle fasce nei punti di massima erosione dovuta all'evento Vaia.....	23
Fig. 11: Fasce e fasce sovrapposte.....	28
Fig. 12: Differenze tra FDE ed FDM in presenza di opere di difesa significative.....	29
Fig. 13: Esempio di notevole allargamento prodotto da Vaia sul Liera.....	30

Fig. 14: Istogramma che evidenzia i notevoli allargamenti del Liera post-Vaia.....	30
Fig. 15: Confronto tra aree dell'alveo pre e post Vaia e le aree delle fasce per il Torrente Cordevole.....	31
Fig. 16: Confronto tra aree dell'alveo pre e post Vaia e le aree delle fasce per il Torrente Tegnass.....	32
Fig. 17: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Liera.....	32
Fig. 18: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Pettorina.....	33
Fig. 19: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Corpassa.....	33
Fig. 20: Esempi di arretramenti dovuti alla Tempesta Vaia che sono andati oltre le fasce e talvolta anche alla pianura alluvionale.....	37
Fig. 21: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per il Cordevole.....	39
Fig. 22: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per il Cordevole.....	40
Fig. 23: Relazione tra R_{PA} e W_{PRE} per il Cordevole.....	41
Fig. 24: Relazione tra R_{FDM} , R_{FDE} e R_{PA} con il q_{peak}	42
Fig. 25: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per i quattro tributari.....	44
Fig. 26: Relazione tra R_{FDE} e W_{PRE} per i quattro tributari.....	45
Fig. 27: Relazione tra R_{PA} e W_{PRE} per i quattro tributari.....	46
Fig. 28: Relazione tra q_{peak} e indici "R" per i quattro tributari.....	46

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1: Riassunto degli elementi necessari alla costruzione delle FFDM.....	15
Tab. 2: Numero di tratti e sigla per ciascun corso d'acqua.....	18
Tab. 3: Tasso di arretramento medio annuo e erosione potenziale futura per il Torrente Cordevole	25
Tab. 4: Tasso di arretramento medio annuo e erosione potenziale futura per i Torrenti Tegnass, Liera, Pettorina e Corpassa.....	25
Tab. 5: Arretramenti massimi (in metri) causati dalla Tempesta Vaia con distanza dell'alveo pre-evento dal limite delle fasce e della pianura alluvionale (in metri) per il Torrente Cordevole.....	34
Tab. 6: Arretramenti massimi (in metri) causati dalla Tempesta Vaia con distanza dell'alveo pre-evento dal limite delle fasce e della pianura alluvionale (in metri) per i quattro tributari del Cordevole	35
Tab. 7: W_{PRE} e q_{peak} per il Torrente Cordevole.....	38
Tab. 8: W_{pre} e q_{peak} per il Tegnass, il Liera, il Pettorina e il Corpassa.....	43
Tab. A1: Dimensioni dei tratti del Cordevole.....	50
Tab. A2: Dimensioni dei tratti dei quattro tributari.....	50
Tab. A3: Aree degli alvei pre e post Vaia, delle fasce e della pianura alluvionale per il Cordevole.....	51
Tab. A4: Aree degli alvei pre e post Vaia, delle fasce e della pianura alluvionale dei quattro tributari.....	51

Tab. A5: Indici percentuali derivanti dai rapporti tra l'erosione massima di Vaia e le ampiezze delle fasce e della piana alluvionale nel medesimo punto per il Cordevole.....	53
Tab. A6: Indici percentuali derivanti dai rapporti tra l'erosione massima di Vaia e le ampiezze delle fasce e della piana alluvionale nel medesimo punto per i tributari.....	53

LISTA DEI SIMBOLI

- W_{PRE} : ampiezza dell'alveo pre-evento.
- q_{peak} : portata di picco unitaria durante l'evento Vaia.
- E_{max} : Erosione massima causata da Vaia.
- D_{FDM} : Distanza dall'alveo pre-evento dal limite della FDM nel punto in cui è avvenuta l'erosione massima causata da Vaia.
- D_{FDE} : Distanza dall'alveo pre-evento dal limite della FDE nel punto in cui è avvenuta l'erosione massima causata da Vaia.
- D_{PA} : Distanza dall'alveo pre-evento dal limite della pianura alluvionale nel punto in cui è avvenuta l'erosione massima causata da Vaia.
- R_{FDM} : rapporto tra E_{MAX} e D_{FDM} espresso in percentuale.
- R_{FDE} : rapporto tra E_{MAX} e D_{FDE} espresso in percentuale.
- R_{PA} : rapporto tra E_{MAX} e D_{PA} espresso in percentuale;

ABSTRACT

The management and monitoring of rivers have always been matters of interest and study, because of the resources that rivers provide, and because of their danger during high magnitude events.

During the years, some methodologies that use “river corridors” have been developed for predict the future evolution of the rivers channels during an extreme streamflow. These corridors are built around the rivers active channels, using a GIS software (Geographic Information System). The river corridors are built using an historical analysis of the past rivers channels and a prevision of the future erosion. In this work the used methodology is described in the book “IDRAIM” of ISPRA (Italian institute for the research and protection of the environment) and it’s called “morphodynamic corridors”.

This work considers a part of the Cordevole river basin, in particular a part of the river Cordevole and four of its tributaries: Tegnas, Liera, Pettorina and Corpassa. Two different corridors were built: MC (Morphodynamic Corridor) and EMC (Event Morphodynamic Corridor). MC is made using the historical channels between 1950 and 2015, and the future erosion of the next 50 years. EMC uses historical channels between 1900 and 2015, and the erosion of the next 100 years.

In this work the morphodynamic corridors are tested using the rivers channels after the Vaia storm (October 2018). The analysis includes the comparison of the areas of the pre and post Vaia rivers channels with the areas of the corridors (per reaches) and with the measurement of the maximum erosion for every reach, compared with corridors width at the same point. The indices obtained were correlated with the average width of the pre-Vaia rivers channels and the unit peak discharge measured during the storm.

The results obtained show that as the width of the pre-event riverbed decreases, the corridors lose their effectiveness in predicting maximum erosion, with the EMC being more effective than the MC. In fact, the two corridors are useful for the Cordevole that is the main river of the basin, while for smaller tributaries this methodology is not very effective.

On the other hand, no correlation was found between unit peak flow rate and effectiveness of the bands.

RIASSUNTO

La gestione e il monitoraggio dei corsi d'acqua sono da sempre motivo di interesse e di studio, per le risorse che i corsi d'acqua mettono a disposizione, e per la loro pericolosità in caso di eventi di piena.

A tale scopo nel corso degli anni sono state sviluppate varie metodologie che prevedono l'utilizzo di "fasce" costruite attorno agli alvei attivi dei corsi d'acqua basate sull'analisi storica degli alvei e sulla previsione dell'erosione futura tramite il calcolo dei tassi di arretramento spondale. Tali fasce sono state ideate per prevedere l'evoluzione futura dei corsi d'acqua in caso di eventi di piena. In questo lavoro è stata utilizzata la metodologia delle "Fasce fluviali di dinamica morfologica" presente nel manuale "IDRAIM" dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), applicate nel bacino del Torrente Cordevole, in particolare su di un settore di quest'ultimo e su quattro suoi tributari: Tegnas, Liera, Pettorina e Corpassa.

La metodologia prevede lo sviluppo di due fasce di diverse dimensioni: l'FDM (Fascia di Dinamica Morfologica) che comprende gli alvei storici dagli anni '50 del XX secolo, fino al presente e l'erosione potenziale nei futuri 50 anni; l'FDE (Fascia di Dinamica da Evento) che invece comprende gli alvei da inizio XX secolo fino al presente, e l'erosione potenziale nei futuri 100 anni.

L'efficacia delle fasce è stata testata facendo riferimento alla Tempesta Vaia dell'ottobre del 2018, la quale ha causato modificazioni morfologiche rilevanti degli alvei.

L'analisi comprende il confronto tra le aree degli alvei pre e post Vaia con le aree delle fasce (a scala di tratto) e con la misurazione degli arretramenti massimi per tratto, comparati con l'ampiezza delle fasce nel medesimo punto. Gli indici ottenuti sono stati messi in relazione con l'ampiezza media degli alvei pre-Vaia e con la portata di picco unitaria durante l'evento alluvionale.

I risultati ottenuti evidenziano come al diminuire dell'ampiezza dell'alveo pre-evento, le fasce perdano di efficacia nel prevedere gli arretramenti massimi, con l'FDE che, essendo più estesa, risulta più efficace rispetto all'FDM. Infatti, le due fasce risultano essere utili per il Cordevole in quanto corso d'acqua di discrete dimensioni, mentre per i tributari le due fasce risultano poco efficaci, ed è preferibile considerare l'intera pianura alluvionale come unica fascia potenzialmente riattivabile da un punto di vista geomorfologico.

Non è stata riscontrata, invece, una correlazione tra portata di picco unitaria ed efficacia delle fasce.

1. INTRODUZIONE

I fiumi, e in generale tutti i corsi d'acqua, sono da sempre ambienti attorno ai quali l'uomo ha vissuto e costruendo e sviluppando i propri insediamenti, in quanto questi ambienti forniscono risorse idriche e alimentari, oltre ad essere una fondamentale via di comunicazione. I corsi d'acqua sono però degli elementi naturali molto dinamici, che possono passare da momenti di magra estrema in periodi di siccità, a catastrofiche inondazioni a seguito di forti piogge. L'uomo, perciò, ha da sempre cercato di contrastare questi fenomeni con le conoscenze e tecnologie che aveva a disposizione. Oggi con gli strumenti avanzati in nostro possesso, è possibile analizzare il comportamento dei corsi d'acqua nel tempo, e in questo modo prevedere gli eventuali effetti di una calamità naturale come un'alluvione.

I sistemi fluviali che caratterizzano un bacino idrografico possono essere divisi in tre zone secondo lo schema proposto da Schumm nel 1977, le quali suddividono i sistemi fluviali in base alla posizione nel bacino. La prima zona (zona 1, quella dell'alto bacino) presenta alvei di piccole dimensioni e con pendenze elevate, in questa zona avviene la produzione di sedimento grazie a predominanti fenomeni di erosione. La zona 2 rappresenta la parte dei corsi d'acqua in cui avviene il trasporto dei sedimenti verso valle, fino alla zona 3, dove avviene prevalentemente la deposizione dei sedimenti. La dimensione degli alvei varia, aumentando andando verso valle, mentre il grado di confinamento (vicinanza dei versanti all'alveo del corso d'acqua) diminuisce. Gli alvei possono essere suddivisi in tre categorie in base al loro grado di confinamento: confinati: pianura alluvionale assente, sponde al 90% a contatto con i versanti (tipico degli ambienti montani); semiconfinati: la pianura alluvionale è discontinua con le sponde che sono a contatto con esse per una percentuale tra il 10% e il 90% nel tratto che viene considerato; non confinati: la pianura alluvionale è continua e le sponde sono libere (ambienti di pianura) (Rinaldi et al., 2014).

In questa tesi di laurea magistrale, verranno analizzati cinque corsi d'acqua di ambiente montano. I corsi d'acqua di questo tipo si trovano nella zona media-alta del bacino idrografico di appartenenza, presentano alvei di dimensioni da piccole a intermedie caratterizzati, generalmente, da pendenze relativamente elevate (Rinaldi et al., 2014). Per quanto riguarda il grado di confinamento, essendo corsi d'acqua situati all'interno di valli più o meno strette, essi presentano generalmente un alto grado di confinamento, anche se nelle zone in cui le valli sono più ampie, il grado di confinamento può diminuire, presentando alvei con un grado di confinamento parziale, o addirittura nullo laddove le valli raggiungono l'ampiezza maggiore. A differenza dei corsi d'acqua di pianura, in ambiente montano gli alvei presentano: pendenza elevata come detto in precedenza, un regime torrentizio delle portate caratterizzato da una forte stagionalità, presenza di sedimenti grossolani i quali determinano un'elevata resistenza al moto della corrente e infine una morfologia dell'alveo con forte variabilità spaziale causata dal controllo da parte dei versanti, dei conoidi detritici e del substrato roccioso, mentre presentano una variabilità temporale relativamente bassa, in quanto solo eventi con un'elevata magnitudo possono modificare la morfologia degli alvei (Rinaldi et al., 2014).

Come detto in precedenza, gli ambienti fluviali in caso di eventi di piena, possono risultare pericolosi per le popolazioni e le attività umane. Nel gestire questi ambienti è necessario considerare in maniera opportuna il “rischio idraulico”, ovvero la possibilità che i fenomeni di trasporto di un corso d’acqua possano provocare danni a cose o persone. Esso può essere diviso in due componenti principali: il “rischio da esondazione”, cioè la possibilità che le acque esondate durante un evento possano provocare danni; e il “rischio da dinamica morfologica” che consiste nella possibilità di danni causati dall’erosione e/o sedimentazione provocate dall’interazione tra corrente liquida, sedimenti e materiale legnoso (Rinaldi et al., 2014).

La dinamica morfologica è quindi un importante aspetto da considerare per la gestione dei corsi d’acqua e la valutazione della loro pericolosità. A tal scopo vi sono due tipi di valutazioni da compiere sui corsi d’acqua: una valutazione di tipo lineare che, a scala di tratto, calcola il grado di dinamica morfologica del corso d’acqua analizzato; e una valutazione di tipo areale, che consiste nella zonazione della pianura alluvionale adiacente al corso d’acqua (Rinaldi et al., 2014).

Per le valutazioni di tipo lineare, Rinaldi et al. (2015) hanno proposto due strumenti per la valutazione della dinamica morfologica: “l’Indice di Dinamica Morfologica” (IDM) il quale valuta la dinamica morfologica alla media e lunga scala temporale, concentrandosi soprattutto sulle variazioni morfologiche passate e sulle attuali tendenze di evoluzione; il secondo strumento è la “Classificazione di Dinamica di Evento” (CDE), che valuta le condizioni di dinamica morfologica alla scala dell’evento di piena. La CDE tiene in considerazione quei fattori che identificano maggiormente quel tipo di evento ed i fattori locali (ad esempio la presenza di ponti o altre opere trasversali) che possono causare l’ostruzione dei flussi solidi e liquidi (Rinaldi et al., 2014 e 2015). Queste due metodologie, pur non essendo ancora applicate in modo sistematico da parte degli enti che si occupano di pianificazione e gestione dei corsi d’acqua, sono state sufficientemente testate per lo sviluppo e l’implementazione del metodo IDRAIM (“Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d’acqua”, Rinaldi et al., 2014).

Per le valutazioni di tipo areale, invece, è stata sviluppata una metodologia che prevede la determinazione di “Fasce Fluviali di Dinamica Morfologica” (FFDM). Le FFDM sono state sviluppate ed utilizzate sia in Italia, sia in altri paesi (Rinaldi et al., 2014). In Italia la terminologia più utilizzata in questo campo è “fasce di pertinenza fluviale” (FPF) che identifica quell’area legata e condizionata dai fattori idrologici, geomorfologici ed ambientali di un corso d’acqua (Baruffi et al., 2004). Nella letteratura in lingua inglese le FPF sono tradotte con i termini “river corridors”, “streamway” o “stream corridors”; mentre le FFDM vengono tradotte con “morphodynamic corridors”. Un esempio di utilizzo delle FPF è quello utilizzato da Baruffi et al. (2004) sul fiume Tagliamento. In questo articolo gli autori identificano tre diversi criteri per la creazione delle FPF: idrodinamico, geomorfologico ed ecologico. Il criterio più utilizzato e studiato per la creazione di FPF è quello geomorfologico, il quale si basa sull’analisi storica tramite cartografia e foto aeree degli ultimi 200 anni, e una proiezione futura di 50 anni utilizzando il tasso di erosione medio annuo. Con questo metodo si costruiscono tre fasce di ampiezza crescente (A, B e C) ampliando la grandezza delle fasce tenendo in considerazione

vari aspetti geomorfologici o antropici. Applicando tutti e tre i criteri previsti per le FPF (idrodinamico, geomorfologico e ecologico) si ottengono quindi 9 fasce, in quanto anche per gli altri due criteri, oltre a quello geomorfologico, si ottengono tre fasce (A, B e C).

I primi lavori in cui sono stati utilizzati concetti simili alle FFDM e alle FPF risalgono agli anni '90 del XX secolo. Ad esempio, lo studio di Govi et al. (1994) analizza il metodo di costruzione delle "fascia di pertinenza fluviale" nei tratti di pianura dei corsi d'acqua. La metodologia illustrata in questo lavoro prevede l'analisi della cartografia storica e delle foto aeree del 1954-55 e del 1988-89 per la ricostruzione della morfologia fluviale del passato, ed un'analisi dei dati altimetrici e idrometrici, per prevedere il livello della piena che nei vari punti del fiume possono provocare la fuoriuscita dei deflussi dagli alvei. Sui dati ottenuti si basa la costruzione delle FPF, tenendo in considerazione anche gli elementi antropici presenti nelle zone studiate.

Per quanto riguarda la letteratura estera, ad esempio nello studio statunitense Lagasse et al. (2004), nonostante non vengano costruite delle fasce simili alle FFDM, viene comunque analizzata l'evoluzione storica dei corsi d'acqua tramite cartografia e foto aeree, le quali consentono di stimare gli arretramenti degli alvei in punti di interesse per varie infrastrutture come strade e ponti.

L'evoluzione e la differenziazione dei metodi di costruzione delle fasce, ad esempio l'utilizzo di più criteri, oltre alla geomorfologia del corso d'acqua, ha portato all'evoluzione della metodologia per la costruzione delle FPF portandole, se pur restando simili come concetto, a differenziarsi dalle FFDM presentando appunto diversi criteri per la loro costruzione. La diversa metodologia usata per costruire le FPF, basata su tre diversi criteri, ha portato l'ISPRA ad identificare una nuova metodologia per la costruzione delle FFDM basata sull'analisi storica dei corsi d'acqua e sulla proiezione futura tramite il calcolo dei tassi di arretramento, tralasciando quindi il criterio idrodinamico ed ecologico per la costruzione delle fasce, e considerando solo il criterio geomorfologico.

2. OBIETTIVI

L'obiettivo di questa tesi è costruire delle FFDM seguendo la metodologia illustrata da ISPRA (Rinaldi et al., 2014) sul Torrente Cordevole, e su quattro dei suoi tributari (Tegnas, Liera, Pettorina e Corpassa). La metodologia delle FFDM, rispetto alle altre metodologie per l'analisi della dinamica morfologica (IDM e CDE), è stata applicata finora in pochi corsi d'acqua e necessita pertanto di ulteriori test. Inoltre, gli effetti provocati dalla tempesta Vaia, offrono un ottimo banco di prova per le FFDM. Infatti, in questo studio, una volta costruite le fasce, verrà analizzata la loro efficacia nel prevedere la dinamica morfologica di un evento ad alta magnitudo come Vaia. Questo permette di testare in modo efficace questa metodologia, in ben cinque corsi d'acqua di diverse dimensioni e caratteristiche.

3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

3.1 IL TORRENTE CORDEVOLE

L'area di studio considerata in questa tesi si trova all'interno del bacino idrografico del Torrente Cordevole, situato nelle Dolomiti (Alpi orientali). Il Cordevole è uno dei principali affluenti del Fiume Piave, uno dei maggiori fiumi del Nord-Est italiano. La sua sorgente è situata in prossimità del Passo del Pordoi, nel Comune di Livinallongo del Col di Lana mentre la confluenza con il Piave si trova in prossimità dei comuni di Sedico e Mel. Il Cordevole scorre per circa 79 km e per tutta la sua lunghezza si trova in Provincia di Belluno, ed il suo bacino idrografico copre un'area di 857 km² con altitudini che variano tra i 280 m s.l.m. e i 3343 m s.l.m. (Brenna et al., 2023) (l'altitudine massima del bacino corrisponde alla cima della Marmolada, punto più elevato delle Dolomiti). Nel suo percorso il torrente transita per vari comuni del bellunese quali Arabba, Caprile, Alleghe, Agordo, Mas ecc. Inoltre, tra i comuni di Agordo e Mas la valle del Cordevole attraversa il Parco Nazionale delle Dolomiti Bellunesi.

Il clima del bacino del Cordevole è influenzato particolarmente dall'altitudine e dall'esposizione al sole delle varie zone. La temperatura media annua è di circa 7 gradi con precipitazioni medie di circa 1100 mm annui (Rigon et al., 2013). Il clima è tipicamente alpino con inverni freddi e nevosi ed estati temperate, con le precipitazioni distribuite principalmente in autunno e durante la stagione estiva (Brenna et al., 2023).

I suoi principali tributari, alcuni di questi considerati in questo lavoro, sono il Fiorentina e il Pettorina, i quali confluiscono nel Cordevole nelle vicinanze del comune di Caprile; il Bois che si immette nel Cordevole nelle vicinanze di Cencenighe Agordino (un tributario del Bois, il Liera, sarà oggetto di analisi in questo lavoro) e nelle vicinanze di Taibon altri due tributari confluiscono nel Cordevole: il Corpassa e il Tegnass.

Le rocce che compongono il bacino idrografico sono principalmente dolomie, calcari, rocce vulcaniche e depositi quaternari. Per il 40% della superficie il bacino è coperto da foreste (Rigon et al., 2013).

Nel bacino del Cordevole sono presenti vari laghi di origine artificiale per la produzione di energia idroelettrica (laghi di Cencenighe Agordino, del Cavia sul Torrente Bois e del Mis sull'omonimo torrente) e il lago naturale di Alleghe. Per il Torrente Cordevole, lo sbarramento di Cencenighe viene identificato, in questo lavoro, come punto iniziale per l'analisi sul corso d'acqua.

L'alveo del Torrente Cordevole è "confinato" per gran parte della sua lunghezza trovandosi all'interno di una valle alpina, salvo avere un minore grado di confinamento nella zona di Agordo e negli ultimi tratti prima di entrare nella valle del Piave. Nei tratti appena precedenti alla confluenza con il Piave risulta invece essere "non-confinato". In questi tratti finali del Cordevole esso presenta un alveo largo e a "canali intrecciati", con la presenza di isole di grandi dimensioni.

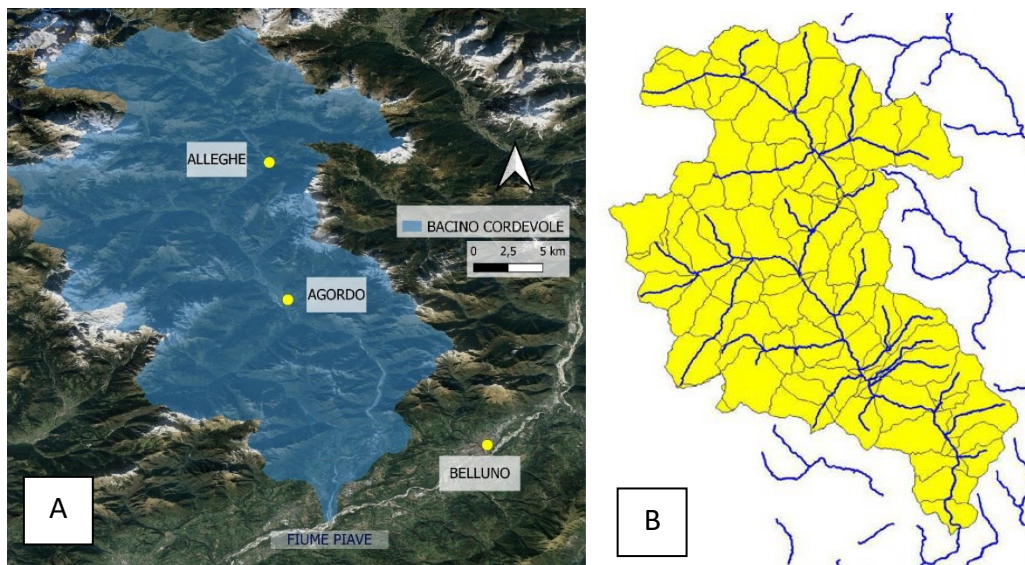


Figura 1: a) Bacino idrografico del Cordevole. b) Idrografia del bacino del Cordevole (Fonte: "LIVELLI E PORTATE MEDIE GIORNALIERE DEL TORRENTE CORDEVOLE A PONTE MAS NEGLI ANNI 2003-18", ARPAV, 2019)

3.2 I TRIBUTARI DEL CORDEVOLE

I Tributari del Cordevole presi in considerazione in questa tesi sono: il Torrente Tegnass, il Corpassa e il Pettorina; inoltre fa parte di questo lavoro anche il Torrente Liera, tributario del Bois che è un affluente de Cordevole.

Il Torrente Tegnass è un affluente di destra del Cordevole, esso è lungo 11 km e nella prima parte del suo corso percorre la Valle d'Angheraz in direzione S-N, per poi confluire nella Valle di San Lucano, percorrendola in direzione W-E ed immettendosi nel Cordevole presso la località di Taibon Agordino, poco a Nord del comune di Agordo.

Risalendo la Valle del Cordevole, vicino a Taibon, in località Listolade il Torrente Corpassa confluisce nel corso d'acqua principale lungo la sponda sinistra del Cordevole. Questo torrente, lungo 6 km, è il più breve corso d'acqua presente in questo lavoro e percorre l'omonima valle scorrendo in direzione NNE-SSW, sorgendo alle falde del massiccio dolomitico del Civetta e, nel suo breve corso, non attraversa nessun centro abitato se non Listolade, in prossimità della confluenza con il Cordevole.

Il Torrente Pettorina sorge nella Val de Ombretta, nel versante meridionale della Marmolada, scorre poi in direzione W-E per 12 km attraversando le località di Sottoguda, Col di Rocca, Rocca Pietore e Caprile dove avviene la confluenza con il Cordevole di cui è un affluente di destra. In prossimità di Sottoguda, il Pettorina ha creato uno stretto canyon denominato "Serrai di Sottoguda".

Infine, il Torrente Liera, lungo 13 è il più lungo corso d'acqua dopo il Cordevole facente parte di questo lavoro. Questo torrente è un tributario del Bois,

quest'ultimo affluente di destra del Cordevole. Il Liera percorre la Val di Gares in direzione SSW-NNE e confluisce nel Torrente Biois presso Canale d'Agordo.

4. LA TEMPESTA VAIA

Nell'autunno del 2018, precisamente nei giorni dal 26 al 30 ottobre, ha avuto luogo nel nord-est Italia la tempesta denominata "Vaia". Questo evento ha provocato forti raffiche di scirocco, mareggiate e straordinarie onde di marea sull'Alto Adriatico, oltre alle forti ed abbondanti piogge. La tempesta si è sviluppata a causa di una zona di bassa pressione tra il Baltico e il Mediterraneo occidentale (Chirici et al., 2019). La tempesta con precipitazioni e venti eccezionali oltre i 200 km/h, ha causato l'abbattimento di circa 41000 ha di bosco (Giovannini et al., 2021) tra Veneto (Dolomiti e Altopiano di Asiago soprattutto), Trentino, Lombardia e Friuli-Venezia Giulia. Oltre ai danni agli ecosistemi forestali la tempesta Vaia ha avuto anche un forte impatto idrogeologico sulle zone colpite, causando frane ed inondazioni, le quali hanno modificato pesantemente gli alvei dei corsi d'acqua colpiti dalla tempesta.

L'evento nel bacino del Cordevole si è suddiviso in due fasi distinte di precipitazione: la prima verificata nei giorni 27 e 28 ottobre, caratterizzata da intense precipitazioni di tipo orografico, mentre la seconda nei giorni 29 e 30 ottobre, ha visto intense precipitazioni di natura convettiva interessare suoli già saturi dalle precipitazioni dei giorni precedenti, e quindi non in grado di drenare l'acqua piovana. Il maggiore cumulativo di pioggia è stato registrato nella parte centrale del bacino con 716 mm (Brenna et al., 2023).

Un evento di tale magnitudo, con venti intensi e precipitazioni abbondanti con picchi di precipitazione nelle zone colpite superiori a 850 mm cumulati in tre giorni, presenta un tempo di ritorno (tempo medio che intercorre tra il verificarsi di un evento ed un altro simile) superiore ai 100 anni (Davolio et al., 2020).

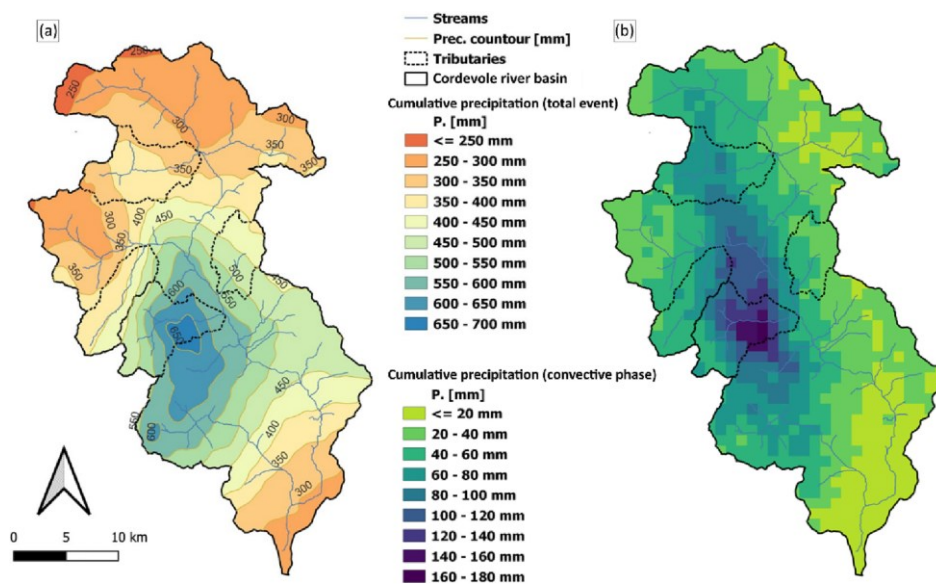


Figura 2: distribuzione delle precipitazioni nella parte di bacino del Cordevole considerata. Fonte: Brenna et al., 2023.

5. MATERIALI E METODI

5.1 LE FASCE FLUVIALI DI DINAMICA MORFOLOGICA

Le “fasce fluviali di dinamica morfologica” corrispondono all’area legata alla dinamica morfologica di un corso d’acqua: un’area composta dall’alveo attivo attuale e dalle aree ad esso adiacenti che in passato sono state interessate dalla dinamica laterale del corso d’acqua (ad esempio gli alvei storici) o che potranno esserlo in futuro (Rinaldi et al., 2014).

Questo lavoro si basa sulla costruzione di due fasce di dinamica fluviale, seguendo il metodo illustrato nel manuale IDRAIM del 2014 (in questo lavoro citato come “Rinaldi et al., 2014”) redatto dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Il lavoro si è svolto prevalentemente utilizzando un software GIS (Geographic Information System), in particolare è stato utilizzato il programma gratuito QGIS. Le due fasce sono denominate nel seguente modo: FDM (Fascia di Dinamica Morfologica) ed FDE (Fascia di Dinamica di Evento).

L’FDM comprende l’attuale alveo del corso d’acqua, che per questa tesi sarà l’alveo del 2015 (precedente all’evento Vaia), e le aree che hanno visto attività fluviale a partire dagli anni ’50 del XX secolo. Inoltre, comprende le aree di possibile riattivazione nei prossimi 50 anni, identificate tramite il calcolo dell’erosione potenziale. L’FDM viene anche delimitata dalle opere di difesa costruite dall’uomo, in questo lavoro però, come limite della fascia, sono state considerate solo le opere di maggiori dimensioni, in quanto quelle di minor grandezza possono non contrastare in modo efficace la dinamica laterale del corso d’acqua. Le zone delimitate dalla fascia hanno un’elevata probabilità di essere interessate nel futuro dalla dinamica laterale del corso d’acqua considerato nel medio termine, anche in assenza di eventi ad alta magnitudo (Rinaldi et al., 2014). L’FDE, di maggiori dimensioni rispetto alla FDM, comprende anch’essa l’alveo attuale (in questo caso l’alveo del 2015) e le zone che sono state attive negli ultimi 100-200 anni. Questa tesi considera come zone attive più antiche quelle attive a fine XIX secolo ed inizio XX secolo. L’FDE poi comprende le possibili aree riattivabili durante un evento ad alta magnitudo, identificate calcolando l’erosione potenziale nei futuri 100 anni. Al contrario della FDM non considera le opere di difesa come dei limiti, in quanto un evento molto intenso potrebbe oltrepassare le difese, a meno che non vengano esplicitamente considerate affidabili in caso di tali eventi (in questo lavoro non è stata considerata nessuna difesa per quanto riguarda l’FDE) (Rinaldi et al., 2014).

Per entrambe le fasce il limite massimo viene rappresentato dai confini della pianura alluvionale, cioè le aree attorno ad un corso d’acqua formate da sedimenti fluviali che periodicamente possono venire inondate. Sarà più probabile che la FDE coincida con la piana alluvionale, essendo più estesa, rispetto alla FDM.

	EVOLUZIONE STORICA	EROSIONE POTENZIALE E PROBABILITÀ DI AVULSIONI	ELEMENTI NATURALI DI CONFINAMENTO	OPERE DI DIFESA ED ALTRI ELEMENTI ANTROPICI
FDM	ANNI '50 DEL XX SEC.- PRESENTE	50 ANNI	NON PRIORITARIO	PRIORITARIO
FDE	XIX/INIZIO XX SEC.- PRESENTE	FATTORE MOLTIPLICATIVO 50 o 100	PRIORITARIO PER ALEVI DI PICCOLE DIMENSIONI/ NON PRIORITARIO	NON PRIORITARIO

Tabella 1: Riassunto degli elementi necessari alla costruzione delle FFDM (ripresa da Rinaldi et al., 2014).

La costruzione delle fasce può risultare difficoltosa in caso di alvei di ridotte dimensioni che possono risultare difficili da identificare tramite foto aeree o per cui è complicata la ricostruzione storica o il calcolo dei tassi di erosione. In ambienti montano-collinari come l'area di studio il manuale IDRAIM propone per alvei di piccole dimensioni e con pendenza superiore all'1% di identificare l'FDE come l'intera pianura alluvionale, mentre per l'FDM non ci sarebbero gli elementi per applicarla efficacemente. In questo lavoro, comunque, quest'ultimo dettaglio della metodologia delle fasce fluviali non è stato considerato, applicando su tutti i tratti considerati la metodologia completa, per quanto possibile, sempre allo stesso modo.

L'analisi ha coperto un arco temporale che va da fine XIX secolo fino al 2018 utilizzando foto aeree, cartografia IGM (cartografia dell'Istituto Geografico Militare) ed ortofoto per comprendere l'evoluzione temporale degli alvei considerati. Queste immagini hanno permesso la creazione di vari "shape file", ovvero file di tipo vettoriale, che ricalcano la posizione e la planimetria degli alvei nei diversi periodi storici, e permettono di compiere analisi e misurazioni su di essi, comparandoli tra loro. Gli shape file devono comprendere "l'alveo attivo" del corso d'acqua definito come canali bagnati (ovvero dove l'acqua effettivamente scorre) e le barre di sedimento (Lièbault & Piègay, 2002). Nei casi in cui è stata utilizzata la cartografia, gli shape files contengono i canali bagnati e le barre di sedimento identificate da zone con piccoli pallini neri (vedasi figura 3b). Alcune immagini sono utilizzabili grazie al servizio online WMS del Geoportale Nazionale (di seguito vengono riportati i link utilizzati).

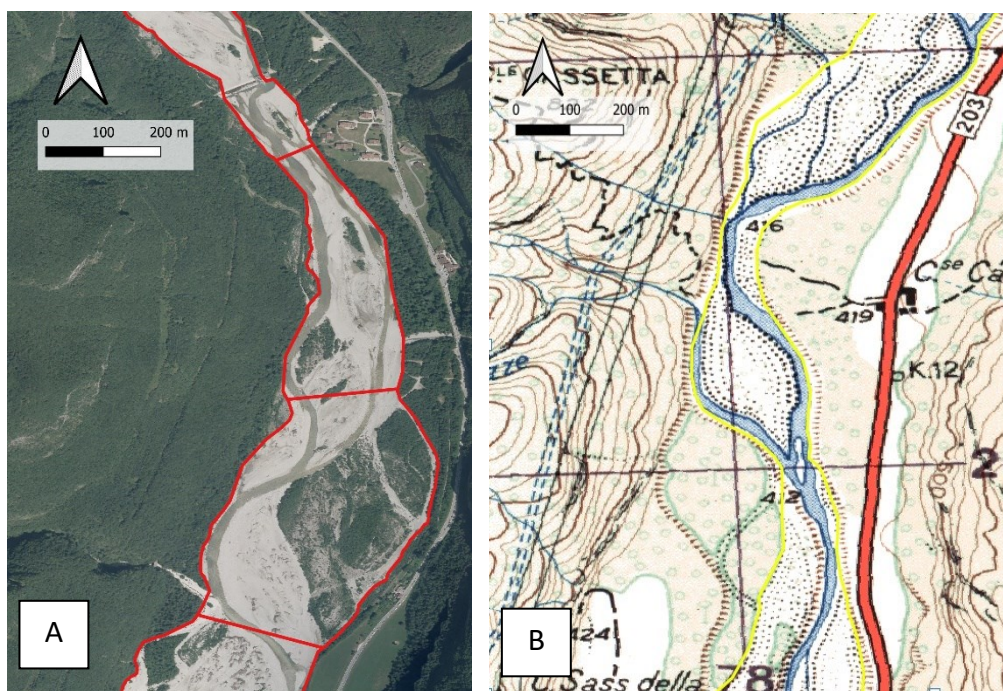


Figura 3: Esempi di digitalizzazione di alvei attivi in: a) Ortofoto, b) Cartografia IGM.

Di seguito vi è la lista delle immagini e della cartografia utilizzate per la costruzione delle fasce.

- Alvei di fine XIX secolo inizio XX secolo utilizzando la cartografia IGM 25.000,
- Alvei del 1954 utilizzando i fotogrammi del volo GAI debitamente georeferenziati;
- Alvei anni '70 del XX secolo utilizzando la cartografia IGM 25.000 (edizione del 1974):
http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/IGM_25000.ma);
- Alvei del 2000 utilizzando ortofoto:
http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/WMS_v1.3/raster/ortofoto_colore_00.map);
- Ortofoto 2015.

Per la cartografia IGM di fine XIX secolo e inizio del XX secolo sono state scannerizzate e georeferenziate quei fogli in cui sono presenti le aree interessate da questa tesi dell'edizione della cartografia del 1901. I fogli utilizzati sono presenti in formato cartaceo presso la Biblioteca di Ca' Borin di Padova.

Altri shape file utilizzati provengono da studi fatti in precedenza sulle stesse aree e sugli stessi corsi d'acqua (Brenna et al., 2023). Essi sono:

- Alvei del 2015 che rappresentano “l’alveo attuale” per la costruzione delle fasce;
- Alvei del 2018 (post tempesta Vaia) necessario per l’analisi post-costruzione delle fasce;
- Opere di difesa antropiche (possibile limite massimo dell’FDM);
- Pianure alluvionali pre-Vaia (limite massimo possibile delle fasce).

Per la costruzione delle fasce, quindi, sono necessari 5 shape file per la FDE, e 4 per la FDM, come illustrato in Figura 4 dove sono illustrati i vari alvei digitalizzati con QGIS e sovrapposti.

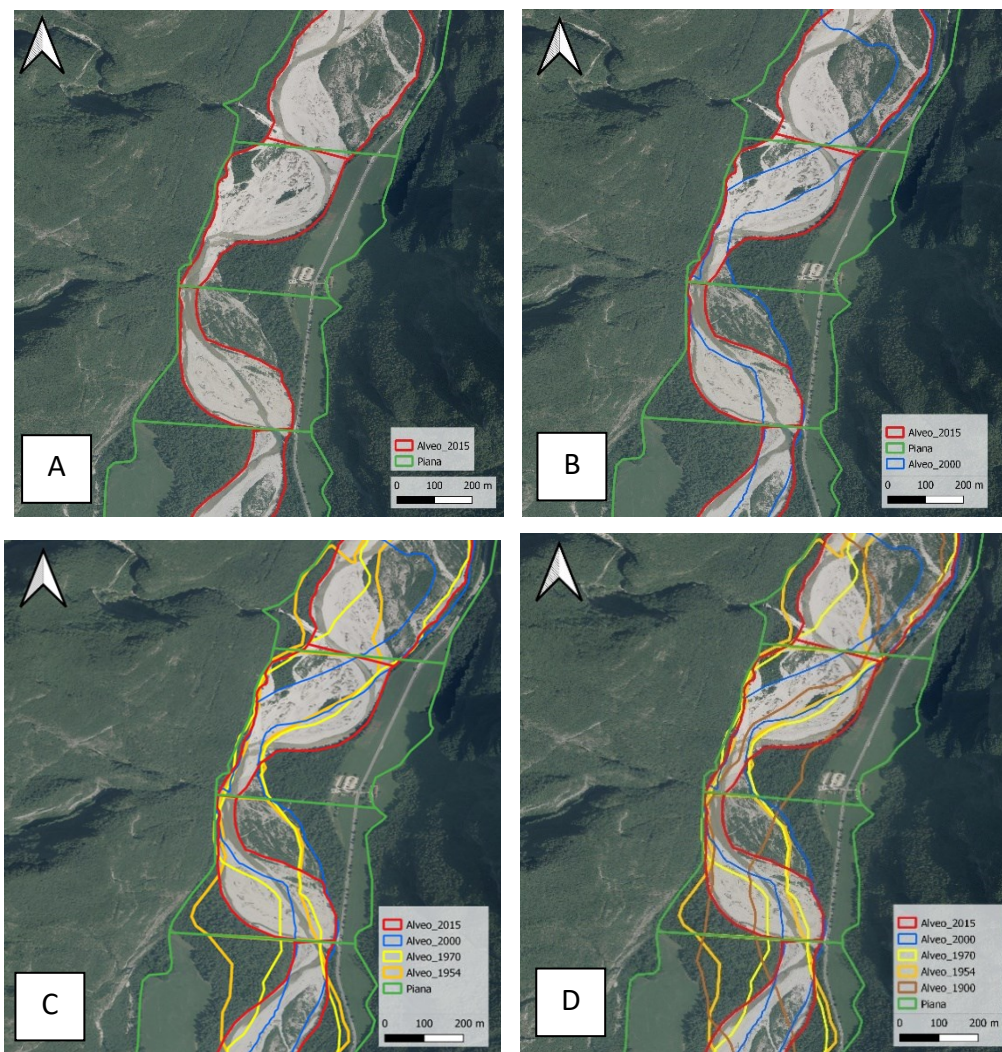


Figura 4: Sovrapposizione progressiva dei vari alvei digitalizzati.

Nella Figura 4c sono presenti gli alvei necessari per la costruzione della FDM, mentre nella Figura 4d quelli per la FDE.

In questo lavoro non sono state costruite le fasce per l’intero corso del Cordevole, considerando solo il settore che va dalla diga di Cencenighe Agordino alla

confluenza con il Piave, mentre per i quattro tributari viene considerato l'intero corso.



Figura 5: Settori dei corsi d'acqua considerati in questo lavoro.

I corsi d'acqua sono stati divisi in tratti geomorfologicamente omogenei che prendendo in considerazione il verificarsi di discontinuità (ad esempio l'immissione di un tributario) o il cambiamento delle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua come confinamento, larghezza dell'alveo, portata, ecc. (Brenna et al., 2023). La suddivisione in tratti utilizzata è quella realizzata da Brenna et al., nel 2023.

CORSO D'ACQUA	N. TRATTI	SIGLA
Cordevole	15	C
Tegnas	8	T
Corpassa	3	CO
Liera	7	L
Pettorina	6	P
TOTALE	39	

Tabella 2: Numero di tratti e sigla per ciascun corso d'acqua

Nelle seguenti figure viene evidenziata, tramite immagini ricavate dal software QGIS, la suddivisione in tratti per i vari settori dei corsi d'acqua considerati in questa tesi.

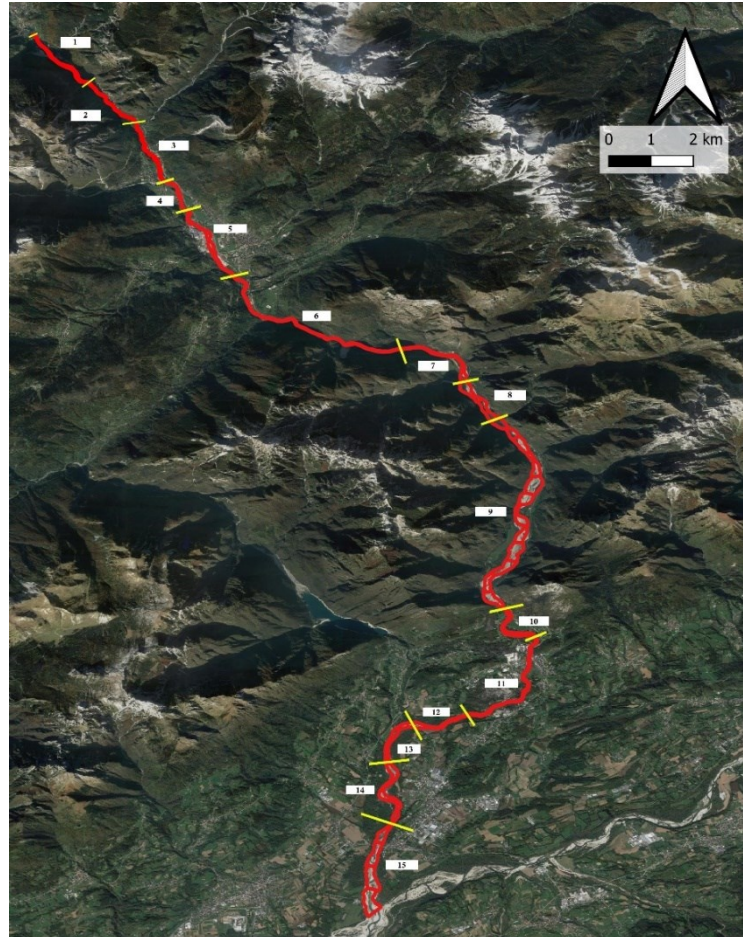


Figura 6: divisione in tratti del settore del Cordevole preso in considerazione.

Il Cordevole, essendo il corso d'acqua di lunghezza e dimensioni maggiori, presenta il maggior numero di tratti (15), con una lunghezza media di circa 2,7 km per tratto, mentre i tributari hanno un minor numero di tratti con il Corpassa che con 3 tratti considerati, in questo lavoro ha il numero minore di tratti (lunghezza media di circa 1,5 km). Il Liera presenta 7 tratti con lunghezza media di 1,3 km, il Tegnas 8 mediamente lunghi 1,3 km, ed infine il Pettorina con 6 tratti di lunghezza media di 1,6 km.

Si ricorda che per questo lavoro il Torrente Cordevole non viene analizzato nel suo intero corso. Il settore considerato parte dalla diga di Cencenighe Agordino fino alla confluenza con il fiume Piave.

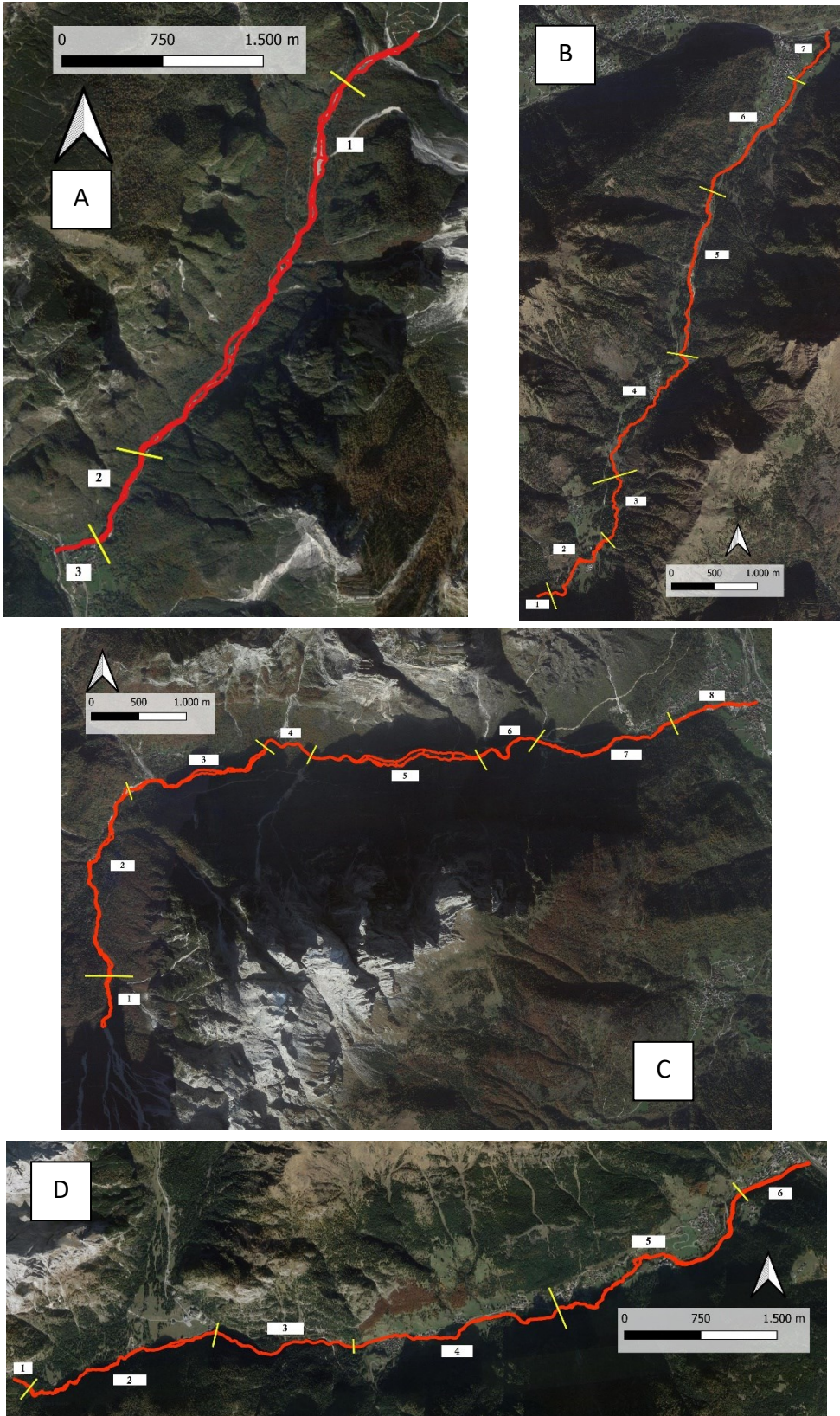


Figura 7: Divisione in tratti per i quattro tributari: a) Corpassa. b) Liera. c) Tegnas. d) Pettorina.

Una volta digitalizzati tutti gli alvei storici necessari alla costruzione delle fasce, per calcolare la potenziale evoluzione futura degli alvei, si è proceduto al calcolo dei tassi di arretramento medi annui per ciascun tratto considerato. La metodologia per il calcolo dei tassi di arretramento spondale si basa sulla misurazione di tutti gli arretramenti avvenuti tra il 2000 e il 2015, utilizzando l'apposita funzione di QGIS e gli shape file degli alvei di quei due anni. Per ogni area di arretramento, viene misurata l'erosione massima, e vengono prese in considerazione solo quelle aree con un arretramento massimo superiore ai 3 metri.

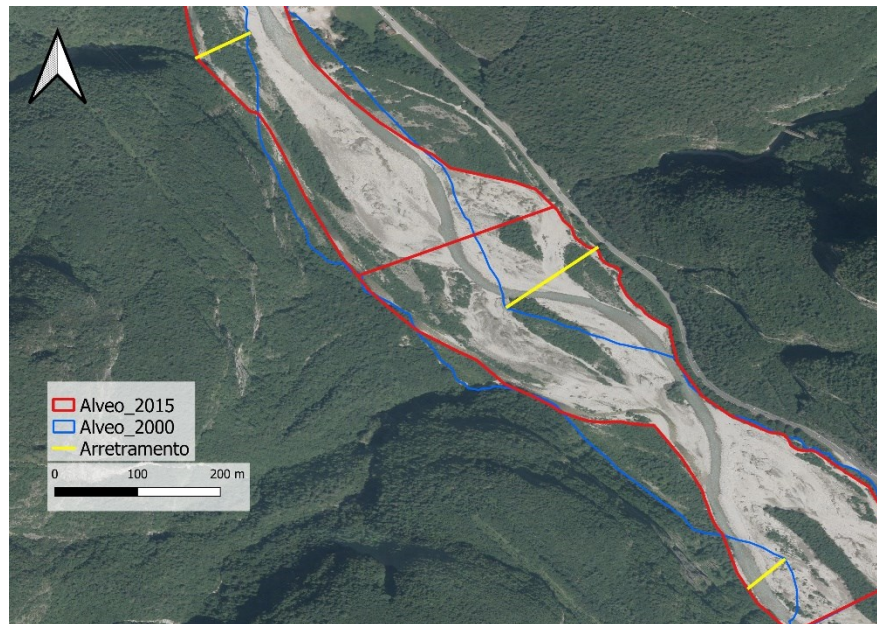


Figura 8: Esempio di misura dell'erosione necessaria al calcolo dei tassi di arretramento medi annui.

Una volta misurati tutti gli arretramenti, è stata calcolata la media aritmetica per tratto e, dividendo le medie ottenute per 15 (gli anni tra il 2000 e il 2015), sono stati ottenuti i tassi di arretramento medi annui per tratto. Questo dato, moltiplicato per 50 (per la FDM) e per 100 (per la FDE) consente di ottenere una previsione dell'erosione potenziale futura, che verrà utilizzata per costruire le fasce tramite l'utilizzo di "buffer" creati tramite l'apposita funzione del software QGIS, con il valore in metri corrispondente all'erosione potenziale futura. I buffer di erosione potenziale vengono posizionati a partire dalle sponde attuali (ovvero dell'alveo 2015 in questo caso) del corso d'acqua. Le fasce, quindi, comprenderanno tutte le aree comprese all'interno di questi buffer e, se non sono comprese all'interno di quest'ultimi, tutte le aree in cui in passato vi era un alveo attivo. Si consiglia, nella creazione degli shape file degli alvei attorno ai quali applicare i buffer, di creare uno shape per ogni tratto considerato, in quanto le grandezze dei buffer variano per ogni tratto.

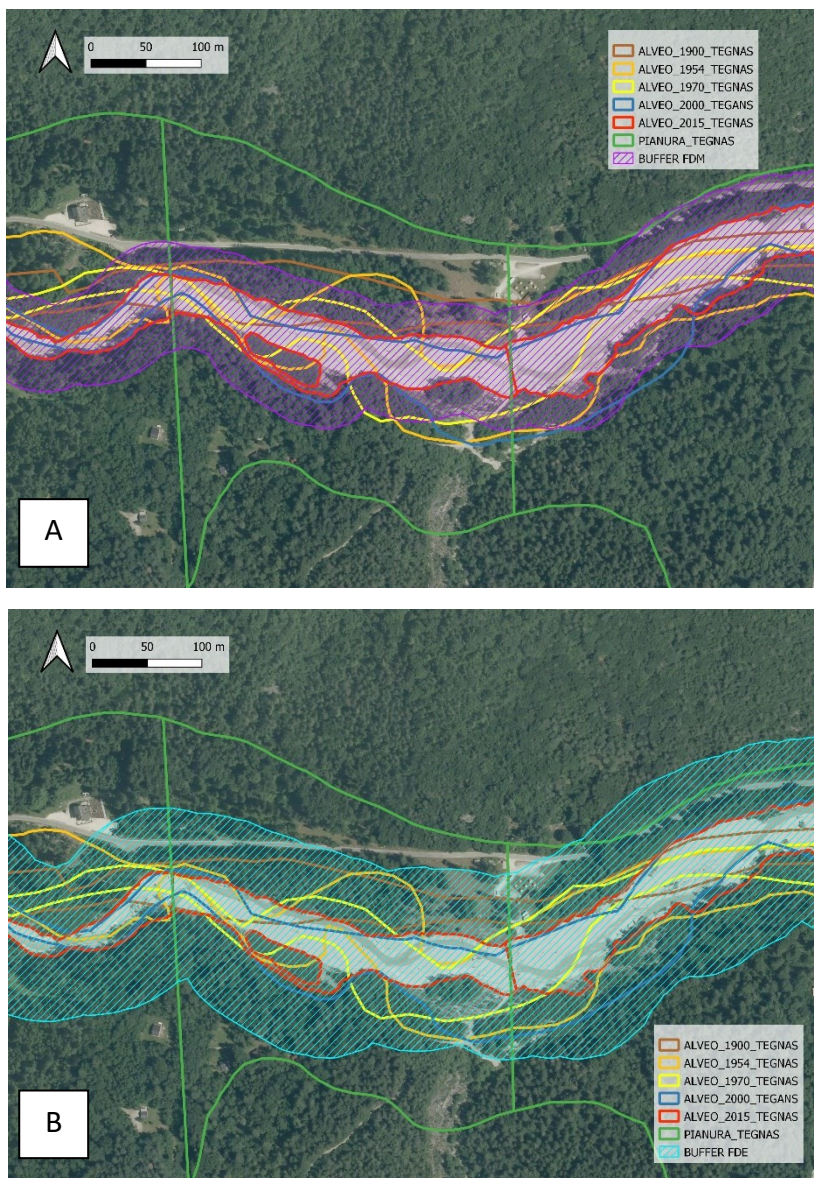


Figura 9: Buffer prodotti grazie all'erosione potenziale, con sovrapposti gli alvei necessari alla costruzione delle fasce: a) FDM. b) FDE.

Da ricordare che il limite massimo delle fasce è data dalla pianura alluvionale, quindi, la porzione di buffer oltre i confini della pianura in Figura 9b non verrà considerata nella costruzione della fascia (in quel caso la FDE).

5.2 CONFRONTO FRA LE FASCE E GLI EFFETTI GEOMORFOLOGICI DI VAIA

Una volta completata la costruzione delle due fasce di dinamica fluviale, per analizzare la capacità delle fasce di prevedere l'evoluzione di un alveo successivamente ad un evento ad alta magnitudo come Vaia, sono state compiute delle misurazioni, sempre tramite il software QGIS.

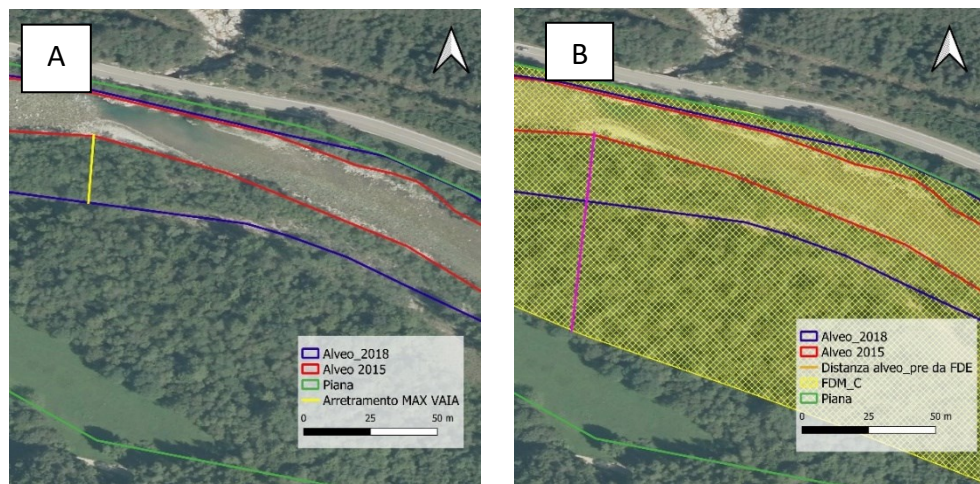
Sono stati misurati i seguenti dati:

- Arretramenti massimi per tratto, uno per la sponda destra e uno per la sponda sinistra, prendendo in considerazione gli alvei del 2015 e gli alvei post Vaia (2018);
- Area degli alvei pre-Vaia per tratto;
- Area degli alvei post-Vaia per tratto;
- Area FDM e FDE per tratto;
- Area piana alluvionale per tratto;

Il calcolo delle aree degli alvei e della piana alluvionale (divisi nei vari tratti) è stato effettuato tramite l'apposita funzione di QGIS.

Inoltre, per ogni tratto è stata calcolata la larghezza media, determinata dividendo l'area della pianura alluvionale con la lunghezza della "centerline", la quale è una linea formata dall'insieme di punti che si trovano al centro dell'alveo (del 2015 in questo caso), quindi i punti aventi la stessa distanza dalla sponda destra e dalla sponda sinistra. I risultati di questa operazione sono riportati in Appendice (capitolo 8). La misura della centerline è stata effettuata sempre tramite QGIS, in quanto dal lavoro di Brenna et al. (2023) è disponibile lo shape file.

Il calcolo degli arretramenti massimi è utile nel testare l'efficacia delle fasce, quale strumento per definire le aree prossime ad un corso d'acqua possibilmente interessate dalla dinamica morfologica prodotta da un evento ad elevata magnitudo, in quanto permette di verificare la bontà delle fasce nei casi in cui l'erosione è risultata più intensa. A tal scopo nei punti di massima erosione dovuta a Vaia, è stata misurata anche la distanza tra l'alveo del 2015 e i limiti delle due fasce e della pianura alluvionale, lungo la stessa retta che identifica l'erosione massima, nella modalità illustrata in Figura 10.



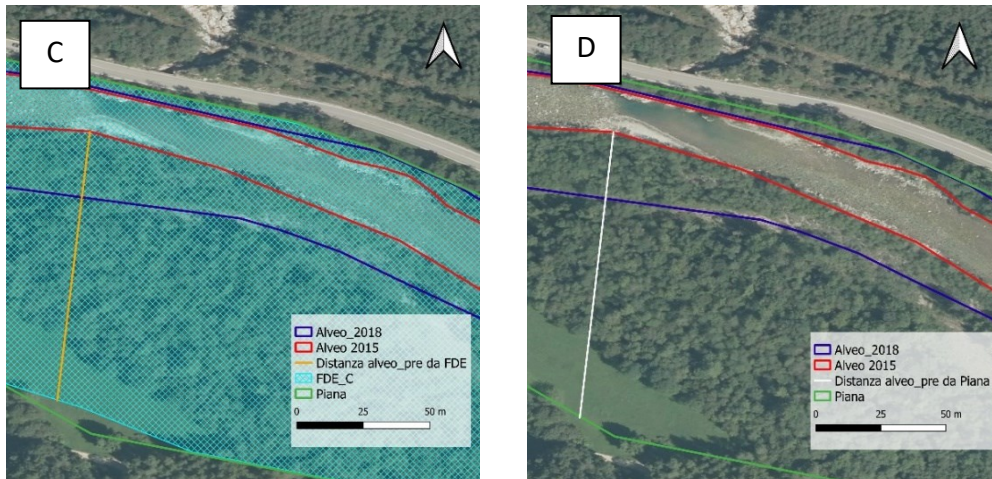


Figura 10: Esempio di misure effettuate per testare l'efficacia delle fasce nei punti di massima erosione dovuta all'evento Vaia.

Queste misure sono state utilizzate per determinare i seguenti indici espressi in percentuale, i quali identificano per quali arretramenti massimi l'alveo post Vaia si trova all'interno delle fasce e della pianura alluvionale, e gli arretramenti che sono andati oltre le fasce o la pianura. Questi indici sono denominati nel seguente modo:

- R_{FDM} per la FDM;
- R_{FDE} per la FDE;
- R_{PA} per la pianura alluvionale;

Calcolati tramite le seguenti formule:

$$R_{FDM} = \frac{Erosione_{Max}}{Distanza_{2015FDM}} * 100 \quad (1)$$

$$R_{FDE} = \frac{Erosione_{Max}}{Distanza_{2015FDE}} * 100 \quad (2)$$

$$R_{PA} = \frac{Erosione_{Max}}{Distanza_{2015PA}} * 100 \quad (3)$$

e rappresentano i rapporti tra l'erosione massima (Figura 10a) e le misure viste in Figura 10b, 10c, 10d.

I valori di questi indici superiori al 100% identificano arretramenti che sono risultati eccedere i limiti delle fasce o della pianura alluvionale.

Questi indici permettono di capire innanzitutto in quante occasioni l'erosione massima ha ecceduto i limiti delle fasce e della pianura; inoltre, maggiore sarà la percentuale oltre il 100%, maggiore sarà la differenza tra erosione massima e limiti delle fasce (in proporzione alle dimensioni delle fasce e degli arretramenti massimi).

5.3 FATTORI CHE INFLUENZANO L'ALLARGAMENTO PARTICOLARMENTE INTENSO DELL'ALVEO NEI TORRENTI MONTANI

Gli indici ottenuti dalle formule (1), (2) e (3), sono stati messi in relazione con il q_{peak} : portata di picco unitaria durante la tempesta Vaia per tratto, (espressa in $m^3s^{-1}km^{-2}$) e la W_{PRE} : larghezza media dell'alveo pre-Vaia per tratto (in metri). Entrambi questi valori sono stati ottenuti dal lavoro di Brenna et al. (2023).

L'elaborazione dei dati e le successive rappresentazioni grafiche (grafici a dispersione e istogrammi) sono stati eseguiti tramite Excel. Questi confronti sono stati effettuati per valutare quali fattori possono influenzare i maggiori allargamenti durante un evento ad elevata magnitudo.

6.RISULTATI

6.1 REALIZZAZIONE DELLE FASCE

Come spiegato nel capitolo 5 (Materiali e Metodi), la costruzione delle fasce si basa sulla digitalizzazione degli alvei storici (Figura 4) e sul calcolo dei tassi di erosione medi annui che poi verranno utilizzati per calcolare l'erosione potenziale futura.

In Tabella 3 sono riportati i tassi di arretramento (in metri) medi annui per tratto, e la potenziale erosione nei futuri 50 e 100 anni per il Cordevole, utilizzati per creare i due buffer. Si ricorda che i tassi di erosione sono stati calcolati con il metodo descritto nel capitolo 5.1 ed illustrato nella Figura 8, e solo per gli arretramenti maggiori di tre metri, tra il 2000 e il 2015.

CORDEVOLE				
TRATTO	Media 15 anni (m)	Media anno (m)	Erosione 50 anni (m)	Erosione 100 anni (m)
1	9	0,6	29	59
2	5	0,3	17	34
3	11	0,7	35	70
4	7	0,4	22	44
5	11	0,7	36	73
6	11	0,7	37	73
7	30	2,0	101	201
8	127	8,5	424	848
9	97	6,5	324	647
10	17	1,1	56	113
11	10	0,7	34	69
12	37	2,4	122	243
13	86	5,7	286	571

14	107	7,1	357	714
15	56	3,7	186	372

Tabella 3: Tasso di arretramento medio annuo e erosione potenziale futura per il Torrente Cordevole.

Per molti tratti del Cordevole, l'erosione media non raggiunge il metro, soprattutto nei primi 6 tratti dove l'alveo del torrente è di minori dimensioni e maggiormente confinato, quindi meno soggetto ad arretramenti laterali. Invece i tratti in cui l'alveo è di maggiori dimensioni e meno confinato l'erosione media risulta maggiore, con valori anche di alcuni metri annui, con il massimo per il tratto 8, dove l'erosione media annua è di circa 8,5 metri. Si può notare come i valori maggiori siano stati ottenuti per la seconda metà del settore di Cordevole analizzato, dove appunto il torrente raggiunge maggiori dimensioni, un grado di confinamento minore e quindi una dinamica laterale potenzialmente maggiore. Naturalmente, maggiore sarà l'erosione media annua, maggiore sarà l'estensione dei buffer calcolati a 50 e 100 anni. I buffer minori avranno dimensioni di alcune decine di metri, mentre, nei tratti con maggiore erosione media, si avranno buffer di alcune centinaia di metri, con il tratto 8 che presenta un buffer di 424 metri e uno di 848. La media dei tassi di erosione annui per il Cordevole è di circa 2,7 metri all'anno.

Nella Tabella 4, invece, sono presenti gli stessi dati ma per i quattro tributari.

TEGNAS				
TRATTO	Media 15 anni (m)	Media anno (m)	Erosione 50 anni (m)	Erosione 100 anni (m)
1	6	0,4	18	37
2	5	0,4	18	36
3	20	1,4	68	136
4	4	0,3	15	30
5	13	0,9	43	86
6	8	0,5	25	51
7	7	0,4	22	43
8	8	0,5	27	53
LIERA				
TRATTO	Media 15 anni (m)	Media anno (m)	Erosione 50 anni (m)	Erosione 100 anni (m)
1	6	0,4	19	38
2	8	0,5	25	51
3	6	0,4	21	41
4	6	0,4	21	41
5	6	0,4	19	39
6	6	0,4	19	38
7	-	-	-	-
PETTORINA				

TRATTO	Media 15 anni (m)	Media anno (m)	Erosione 50 anni (m)	Erosione 100 anni (m)
1	4	0,2	12	23
2	8	0,5	25	51
3	5	0,3	17	34
4	11	0,8	38	76
5	11	0,7	36	72
6	11	0,8	38	76
CORPASSA				
TRATTO	Media 15 anni (m)	Media anno (m)	Erosione 50 anni (m)	Erosione 100 anni (m)
1	10	0,7	34	68
2	4	0,2	12	24
3	3	0,2	11	22

Tabella 4: Tasso di arretramento medio annuo e erosione potenziale futura per i Torrenti Tegas, Liera, Pettorina e Corpassa.

Nella Tabella 4, il tratto numero 7 del Liera non presenta dati in quanto non è stato possibile calcolare l'erosione avvenuta tra il 2000 e il 2015.

Per tutti i tributari è stato ottenuto un tasso di erosione medio annuo inferiore al metro per ogni tratto considerato (salvo il tratto 3 del Tegas che con 1,4 metri presenta il tasso maggiore, e quindi anche i buffer di maggiori dimensioni). Questo evidenzia come a livello di erosione i tributari siano più omogenei rispetto ad un corso d'acqua di maggiori dimensioni come il Cordevole. Anche le medie dei tassi di erosione annui sono minori rispetto al Cordevole, con il Tegas che presenta una media di 0,6 metri, il Liera di 0,4 m, il Pettorina di 0,55 m e il Corpassa di 0,35 m.

Una volta digitalizzati gli alvei storici, e ottenuta l'erosione potenziale futura per ogni tratto, si può procedere alla costruzione delle due fasce creando dei nuovi shape file che inglobano al loro interno tutte le aree attraversate dagli alvei storici e comprese all'interno dei buffer. Nella Figura 11 viene raffigurato un settore del Tegas in cui si possono vedere le fasce ultimate e sovrapposte.

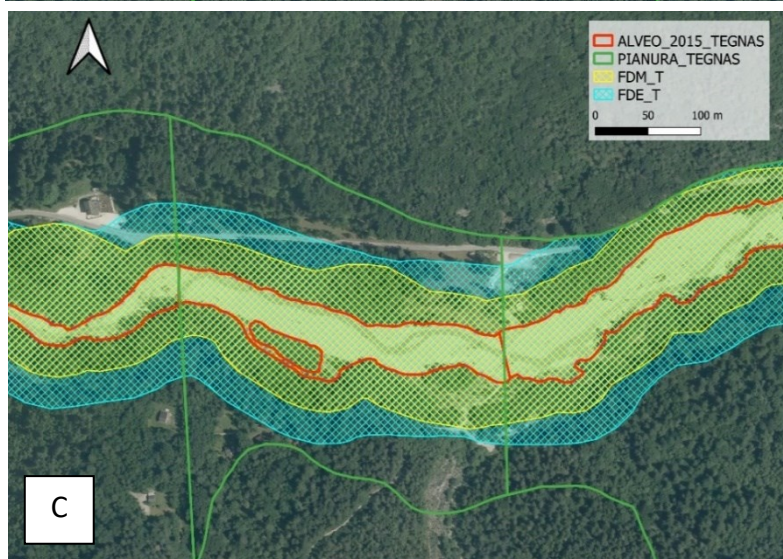
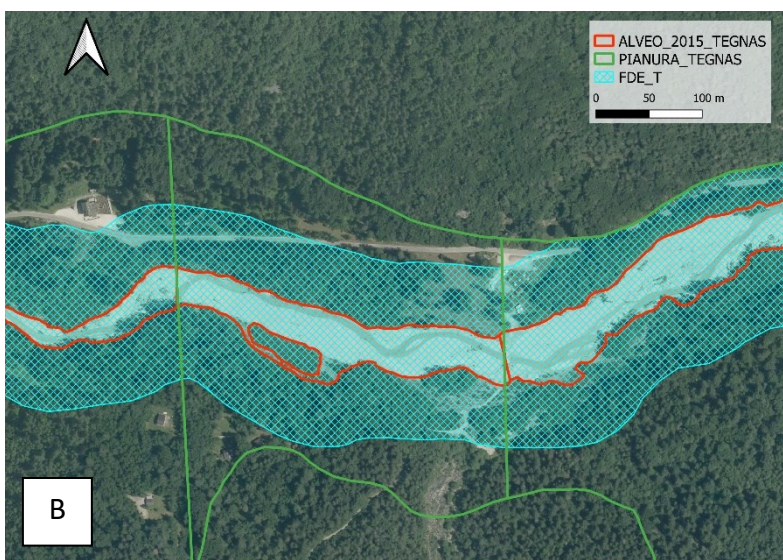
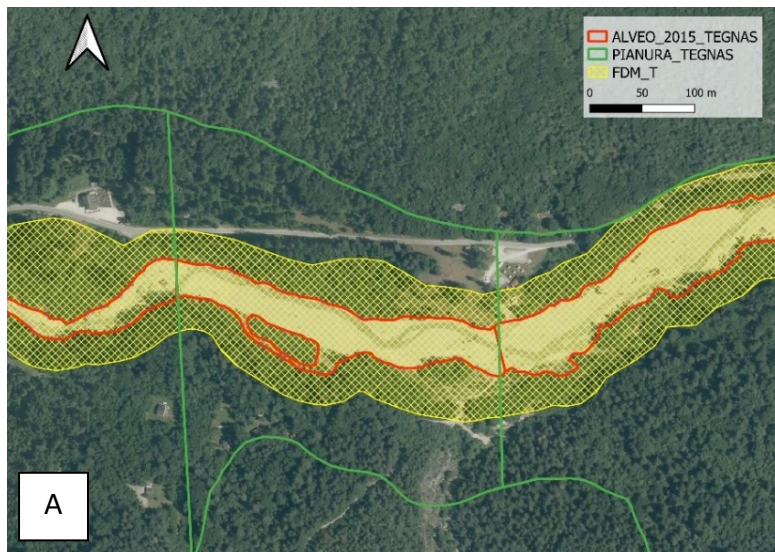


Figura 11: a) FDM. b) FDE. c) FDE e FDM sovrapposte.

Il settore di Tegnás considerato in Figura 11 è lo stesso utilizzato in Figura 9. Si può notare la differenza di dimensione tra le due fasce, con la FDM meno estesa della FDE. Inoltre, in Figura 9b una porzione del buffer della FDE andava oltre i confini della piana alluvionale, mentre la fascia in Figura 11b in quei punti ha il limite che coincide con la piana alluvionale, come era previsto in questi casi dalla metodologia.

Come affermato nel capitolo 5.1, una differenza nella costruzione delle due fasce sta nel fatto che le FDM, in presenza di opere di difesa significative, prendono quest'ultime come limite massimo, mentre per le FDE le opere non rappresentano un limite. Di seguito viene presentato un esempio di una situazione simile sul Cordevole.

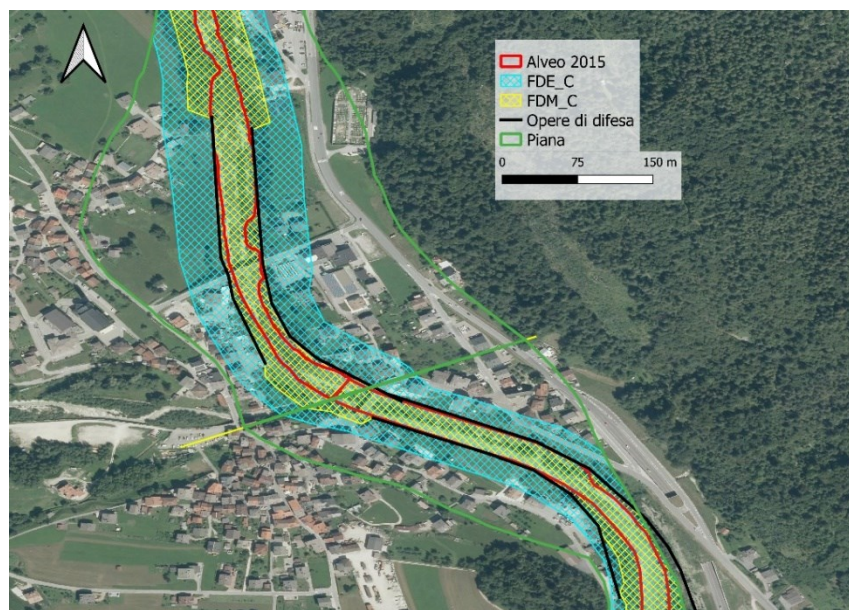


Figura 12: Differenze tra FDE ed FDM in presenza di opere di difesa significative.

Come si può vedere dalla Figura 12, in caso di opere di difesa significative l'FDM utilizza quest'ultime come limite massimo, mentre l'FDE non le considera in quanto un evento di piena molto intenso potrebbe danneggiare e rendere non efficaci le opere.

6.2 RELAZIONI TRA DIMENSIONE DELL'ALVEO PRE E POST-VAIA E FASCE FLUVIALI

Una volta costruite le fasce, si è potuto procedere all'inserimento degli shape file degli alvei post Vaia del 2018, ed iniziare l'analisi per testare l'efficacia delle due FFDM in caso di un evento di elevata magnitudo come Vaia. Nei cinque torrenti considerati, gli effetti sono stati diversi con alcuni corsi d'acqua in cui l'evento ha causato notevoli allargamenti, mentre in altri la dinamica laterale è stata minore.

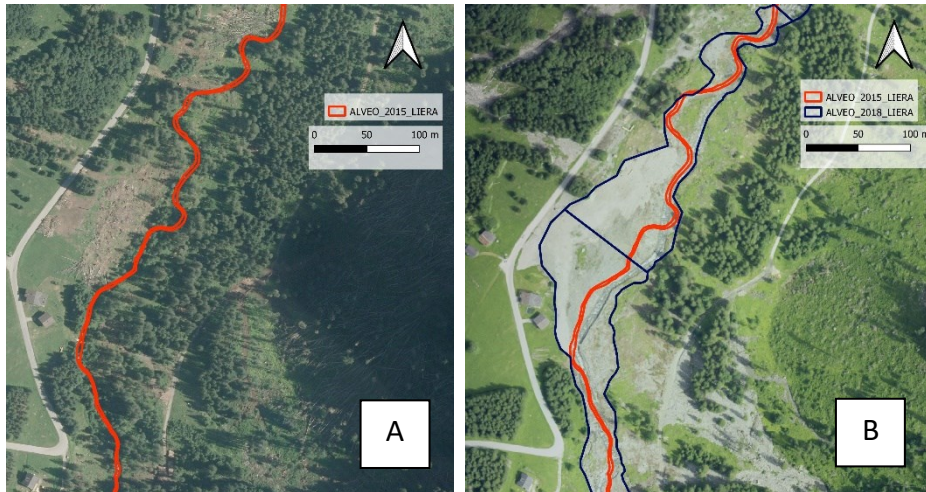


Figura 13: Esempio di notevole allargamento prodotto da Vaia sul Liera: a) Situazione nel 2015. b) Situazione post Vaia (2019)

Dei cinque corsi d'acqua studiati, quello in cui gli effetti di Vaia sono risultati più significativi in termini di erosione delle sponde risulta essere il Torrente Liera (Figura 13).

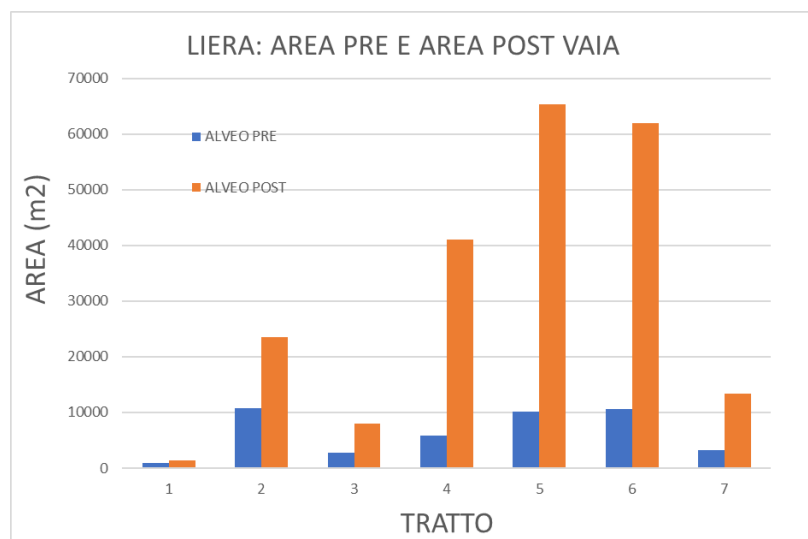


Figura 14: Istogramma che evidenzia i notevoli allargamenti del Liera post-Vaia.

Nella Figura 14 si può notare il notevole aumento della superficie dell'alveo del Liera causata da Vaia, con tratti in cui l'alveo risulta 6 volte più esteso dell'alveo pre-evento.

Oltre al confronto areale tra alveo pre e alveo post Vaia, è stato fatto un confronto tra le diverse aree (espresse in m²) degli alvei, delle due FFDM e della pianura alluvionale. I dati relativi alle aree sono presenti in Appendice nella Tabella A3 per il Cordevole e nella Tabella A4 per i tributari. Graficamente il confronto tra le aree degli alvei (pre e post Vaia) e le aree delle fasce e della pianura alluvionale è stato rappresentato tramite i seguenti istogrammi.

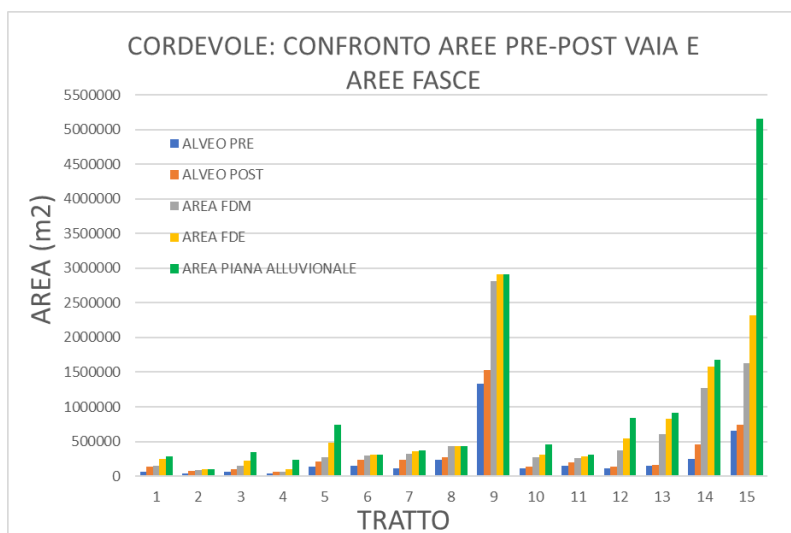


Figura 15: Confronto tra aree dell'alveo pre e post Vaia e le aree delle fasce per il Torrente Cordevole.

Per tutti i tratti del Cordevole considerati in questo lavoro (da Cencenighe alla confluenza con il Piave) vi è stato un aumento della superficie dell'alveo del torrente dovuto alla tempesta Vaia. L'area delle due fasce risulta sempre maggiore rispetto all'area dell'alveo post Vaia (con FDE maggiore dell'FDM) con molti tratti in cui l'area delle fasce, soprattutto la FDE, si avvicina molto all'area della pianura alluvionale, tranne l'ultimo tratto in cui l'area della pianura alluvionale è molto maggiore rispetto all'area delle fasce. In seguito, vengono riportati i medesimi istogrammi per i quattro corsi d'acqua minori.

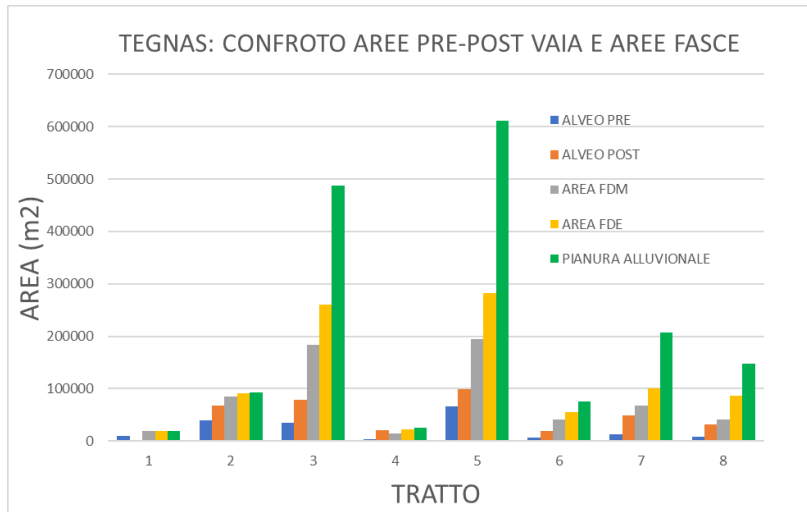


Figura 16: Confronto tra aree dell'alveo pre e post Vaia e le aree delle fasce per il Torrente Tegnass.

Il primo tratto del Tegnass presenta l'area dell'alveo post-Vaia nettamente minore rispetto all'area pre-Vaia in quanto lo shape file dell'alveo del 2018 è stata fatto solo per una piccola parte del primo tratto del torrente. A differenza del Cordevole, che presentava una minor differenza tra l'area delle fasce con l'area della pianura alluvionale, in ben quattro tratti del Tegnass quest'ultima risulta, in proporzione, molto più grande rispetto alle due fasce.

Nel seguente istogramma vengono rappresentate le aree del Torrente Liera. Nel primo tratto l'area della piana alluvionale risulta inferiore rispetto alla FDE in quanto nel primo breve tratto gli shape file degli alvei e delle fasce percorrono un'area in cui non è presente lo shape file della piana alluvionale, il quale inizia poco più a valle. La medesima situazione si è presentata anche per il primo tratto del Torrente Pettorina.

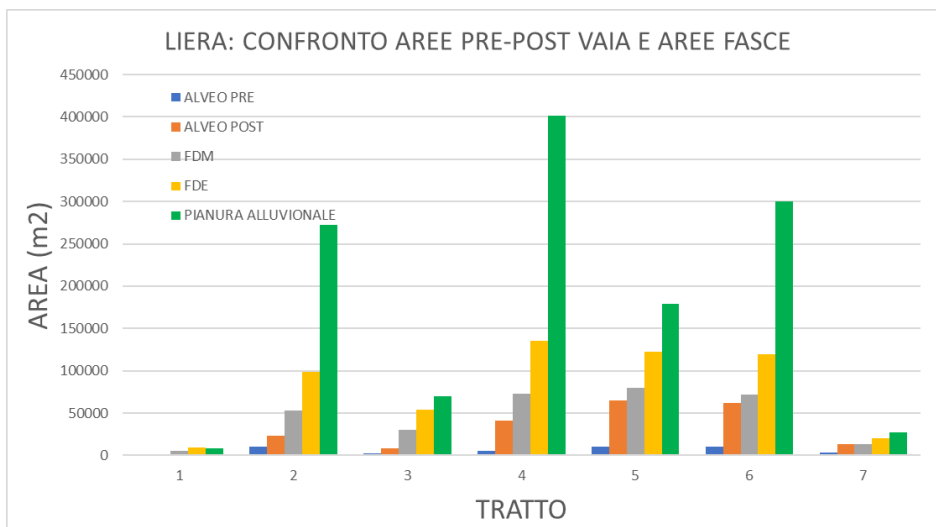


Figura 17: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Liera.

Nel Liera la differenza tra fasce e pianura alluvionale è ancora più marcata rispetto al Tegas, con ben quattro tratti su sette in cui la pianura presenta dimensioni nettamente maggiori rispetto alle FDM.

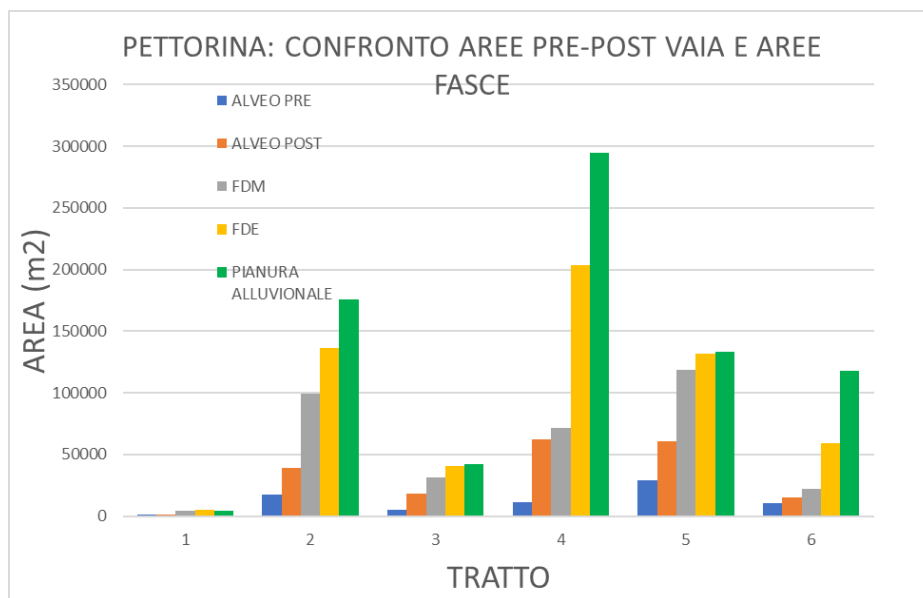


Figura 18: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Pettorina.

Nel Torrente Pettorina, invece, solo in un tratto troviamo molta differenza in dimensioni tra fasce e piana (il tratto 4), vi è una marcata differenza tra FDM e FDE nel tratto 4 e nel tratto 6. Il primo tratto presenta dimensioni minori in quanto l'area digitalizzata per quel tratto è molto meno estesa rispetto agli altri tratti.

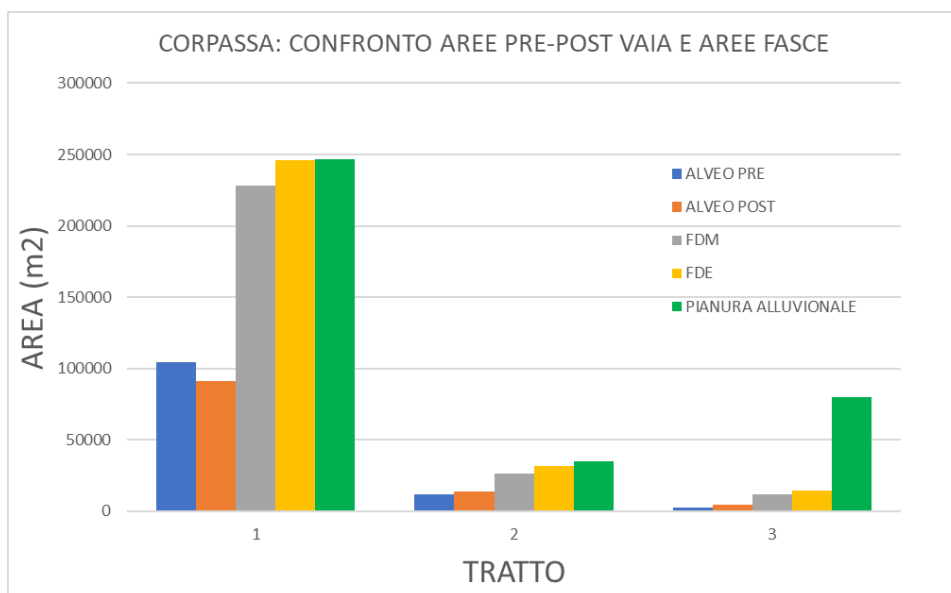


Figura 19: Confronto tra le aree dell'alveo pre e post Vaia e aree delle fasce per il Torrente Corpassa.

Il Corpassa è il corso d'acqua che meno ha risentito degli effetti di Vaia, con addirittura una diminuzione delle dimensioni dell'alveo nel primo tratto, e nessuna notevole variazione negli altri due. Nei primi due tratti, inoltre, l'area delle due fasce quasi coincide con l'area della pianura alluvionale, mentre l'ultimo tratto, che rappresenta lo sbocco del torrente nella valle del Cordevole presenta una maggiore differenza tra area delle fasce e area della piana.

Anche per i tributari, comunque, l'area dell'alveo post-Vaia non è mai stata superiore all'area delle fasce.

6.3 CONFRONTO FRA LE FASCE E GLI ALLARGAMENTI MASSIMI CAUSATI DA VAIA

Per quanto riguarda gli allargamenti dovuti a Vaia, come spiegato nel capitolo 5.2, si è proceduto alla misurazione innanzitutto degli arretramenti massimi per tratto (uno per sponda, ovvero due per tratto), avvenuti a causa dell'evento. Successivamente, nello stesso punto, si è proceduto alla misura della distanza dell'alveo del 2015 dalla FDM, dalla FDE e dalla pianura alluvionale come illustrato in Figura 10.

Nella seguente Tabella 5 sono riportati gli arretramenti massimi in metri per le due sponde del Cordevole con le distanze dell'alveo pre-evento del 2015 dalle due fasce e dalla pianura alluvionale come appunto illustrato in Figura 10. Gli indici nelle seguenti Tabelle 5, 6 sono differenziati per sponda "sinistra" (S) e sponda "destra" (D), espressi in metri, e sono:

- E_{max} : Erosione massima causata da Vaia;
- D_{FDM} : Distanza dal limite della FDM;
- D_{FDE} : Distanza dal limite della FDE;
- D_{PA} : Distanza dal limite della Piana alluvionale.

CORDEVOLE								
TRATTO	$E_{MAX S}$	$D_{FDM S}$	$D_{FDE S}$	$D_{PA S}$	$E_{MAX D}$	$D_{FDM D}$	$D_{FDE D}$	$D_{PA D}$
1	115	68	110	118	62	21	83	130
2	53	29	29	29	38	16	24	25
3	62	54	86	102	67	55	69	69
4	44	24	24	24	80	34	64	138
5	135	128	250	371	56	43	123	177
6	35	27	37	72	70	64	72	37
7	107	160	170	150	180	192	192	234
8	109	247	247	256	20	26	26	45
9	154	184	184	180	264	459	459	458
10	22	42	48	68	41	80	90	92
11	45	28	48	64	27	27	36	56
12	44	83	175	318	38	218	223	608
13	106	403	612	617	35	77	77	75
14	356	610	610	628	228	510	1125	1127
15	82	350	380	1270	102	223	440	1474

MEDIE								
	101	165	203	284	86	136	206	316

Tabella 5: Arretramenti massimi causati dalla Tempesta Vaia (in metri) con distanza dell'alveo pre-evento dal limite delle fasce e della pianura alluvionale (in metri) per il Torrente Cordevole.

Per il Cordevole, la media degli allargamenti massimi per la sponda sinistra è di 101 metri, con un massimo di 154 metri nel tratto 9, ed un minimo di 22 metri nel tratto 10. Per la sponda destra la media è di 86 metri, con un massimo di 264 metri, sempre per il tratto 9, ed un minimo di 27 metri per il tratto 11. Da notare come le medie degli arretramenti massimi, siano entrambe minori delle medie delle altre misure compiute con le fasce e la pianura alluvionale.

Le medesime misurazioni riportate nella Tabella 5 sono state compiute anche per gli altri corsi d'acqua analizzati in questo lavoro. Esse sono state riportate nella seguente Tabella 6:

TEGNAS								
TRATTO	EMAX S	DFDM S	DFDE S	DPA S	EMAX D	DFDM D	DFDE D	DPA D
1	2	13	13	13	5	10	10	10
2	46	26	26	26	26	15	30	37
3	70	99	121	340	44	47	59	60
4	11	11	21	32	8	29	45	57
5	35	48	59	118	66	60	69	134
6	19	17	31	125	34	48	53	102
7	28	18	56	31	37	16	33	127
8	26	27	65	206	45	35	45	70
MEDIE								
	31	32	49	111	33	33	43	75
LIERA								
TRATTO	EMAX S	DFDM S	DFDE S	DPA S	EMAX D	DFDM D	DFDE D	DPA D
1	-	-	-	-	19	14	30	33
2	42	20	37	125	31	27	50	67
3	5	48	48	24	32	22	30	30
4	81	15	32	168	42	18	36	100
5	51	19	36	21	61	13	27	64
6	37	40	40	149	80	69	69	185
7	25	21	21	53	50	8	9	35
MEDIE								
	40	27	36	90	45	24	36	73
PETTORINA								
TRATTO	EMAX S	DFDM S	DFDE S	DPA S	EMAX D	DFDM D	DFDE D	DPA D
1	3	12	12	12	17	12	15	16
2	21	21	43	48	44	45	64	65
3	15	17	35	34	31	12	24	24
4	33	35	64	69	62	32	60	135
5	32	34	35	35	39	39	49	49
6	14	15	53	-	18	12	12	12

MEDIE								
	20	22	40	40	35	25	37	50
CORPASSA								
TRATTO	E_{MAX S}	D_{FDM S}	D_{FDE S}	D_{PA S}	E_{MAX D}	D_{FDM D}	D_{FDE D}	D_{PA D}
1	25	14	14	25	12	30	30	30
2	10	7	7	10	8	9	17	23
3	19	10	19	19	4	13	20	15
MEDIE								
	18	10	13	14	8	17	22	23

Tabella 6: Arretramenti massimi (in metri) causati dalla Tempesta Vaia con distanza dell'alveo pre-evento dal limite delle fasce e della pianura alluvionale (in metri) per i quattro tributari del Cordevole.

Per la sponda sinistra del primo tratto del Torrente Liera non è stato possibile calcolare l'arretramento massimo.

Naturalmente, essendo i tributari di minori dimensioni, i valori risultano minori rispetto al Cordevole. L'erosione massima è avvenuta nella sponda sinistra del tratto 4 del Liera, con 81 metri. Il Liera vanta anche le medie maggiori per quanto riguarda l'erosione massima, con il Corpassa che presenta, invece, i valori medi minori. Da notare come, al contrario del Cordevole, molte volte la media dell'erosione massima sia maggiore rispetto alla media delle distanze dell'alveo pre-evento dal limite delle fasce, nei punti di massima erosione. Questo accade sia per la FDM, sia per la più estesa FDE.

I dati presenti nelle Tabelle 5 e 6 sono stati messi in relazione tramite le formule (1), (2), (3) come spiegato nel capitolo 5.2. Gli indici percentuali ottenuti sono riportati nelle Tabelle A5 e A6 presenti in Appendice (capitolo 8).

Quello che si può intuire dal confronto tra l'erosione massima e il comportamento delle fasce in quelle zone è che può accadere che gli allargamenti causati da Vaia possano andare oltre i limiti delle fasce (talvolta solo dell'FDM) ed anche oltre la pianura alluvionale, se l'erosione ha interessato anche i versanti. Nella seguente Figura 20 vengono riportati quattro esempi di arretramenti che hanno oltrepassato i limiti delle fasce e della pianura alluvionale.

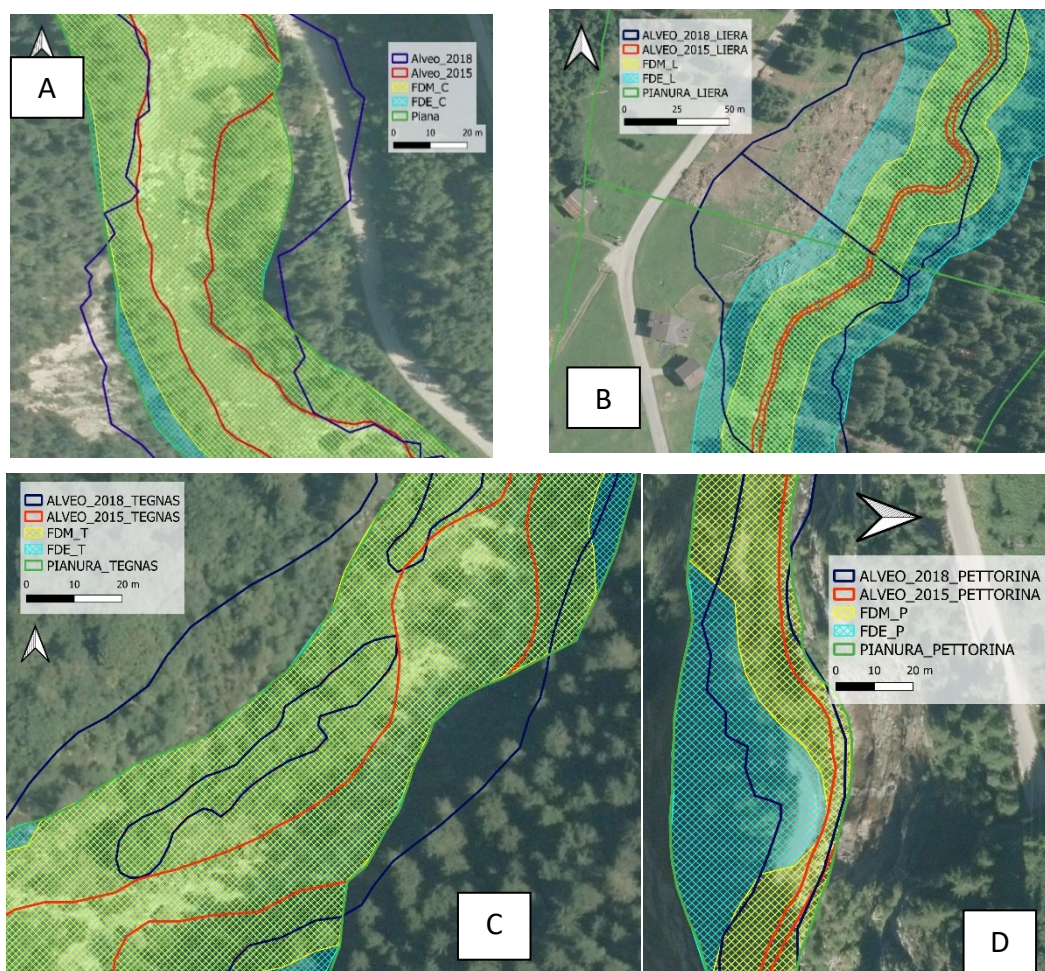


Figura 20: Esempi di arretramenti dovuti alla Tempesta Vaia che sono andati oltre le fasce e talvolta anche alla pianura alluvionale. a) Cordevole. b) Liera. c)Tegnas. d)Pettorina.

Come si può notare dalla Figura 20, nei casi in cui gli allargamenti abbiano interessato i versanti, e quindi oltre la pianura alluvionale, entrambe le fasce risultano più piccole rispetto all'erosione (in quanto si ricorda che la pianura alluvionale è il limite massimo delle fasce) Figura 20a e 20c, mentre può accadere che un allargamento vada oltre entrambe le fasce restando all'interno della pianura come in Figura 20b, o solo oltre l'FDM in quanto meno estesa della FDE (Figura 20d).

6.4 FATTORI CHE INFLUENZANO GLI ALLARGAMENTI PIU' INTENSI

Per analizzare i fattori che potrebbero influenzare gli allargamenti massimi come affermato nel capitolo 5.3 sono stati presi in considerazione la larghezza dell'alveo pre-evento per ogni tratto, e la porta di picco unitaria durante Vaia, sempre per ogni tratto, ottenuti grazie al lavoro di Brenna et al. (2023). Questi due valori sono stati messi in relazione con gli indici percentuali illustrati nelle Tabelle A5 e A6, presenti in Appendice, utilizzando dei grafici a dispersione, con nell'asse delle

ascisse i due valori appena citati, e nell'asse delle ordinate i valori presenti nelle Tabelle A5 e A6.

CORDEVOLE		
Tratto	W_{PRE} (m)	q_{peak} ($m^3/s \cdot km^2$)
1	28	1,92
2	21	1,92
3	24	1,93
4	47	1,94
5	26	2,04
6	54	2,02
7	124	1,98
8	148	1,97
9	65	1,88
10	38	1,88
11	71	1,86
12	87	1,86
13	93	1,77
14	179	1,76
15	-	-

Tabella 7: W_{PRE} e q_{peak} per il Torrente Cordevole.

Si può notare, in Tabella 7, la notevole variabilità della larghezza dell'alveo pre-evento del Cordevole, con un massimo di 179 metri per il quattordicesimo tratto, ed un minimo di 21 metri per il secondo. Mentre la q_{peak} presenta una variabilità minore con valori tra $1,76 m^3s^{-1}km^{-2}$ e $2,04 m^3s^{-1}km^{-2}$.

Per l'ultimo tratto del Cordevole non vi sono dati relativi al W_{PRE} e al q_{peak} .

Di seguito i grafici a dispersione relativi al Cordevole. Per primi vengono riportati i grafici con nell'asse delle ascisse i valori di W_{PRE} , mentre nell'asse delle ordinate vengono riportati i valori degli indici percentuali riportati in Tabella A5 per il Cordevole e Tabella A6 per i tributari. Nei seguenti grafici viene evidenziata la linea orizzontale che corrisponde al valore del 100% degli indici percentuali, la quale indica i punti in cui l'arretramento massimo coincide con la fascia. Valori maggiori del 100% indicano che l'arretramento massimo è andato oltre i confini delle fasce.

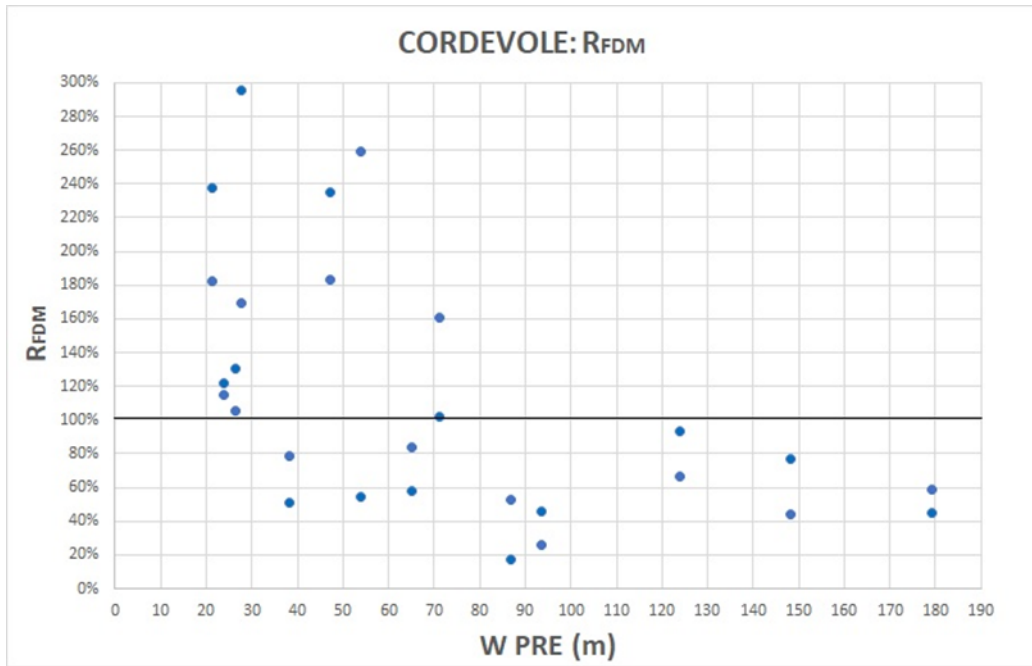


Figura 21: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per il Cordevole.

Per la FDM, nel Cordevole, si ha che per quasi la metà dei casi (13 su 28 cioè il 46%), i valori superino il 100%, quindi punti in cui l'erosione massima è andata oltre la FDM. Questo sembrerebbe accadere nei tratti con una minore larghezza dell'alveo pre-evento, con i valori maggiori al 100% per alvei inferiori a circa 70 metri, mentre per alvei di dimensioni maggiori gli arretramenti massimi rimangono sempre all'interno della FDM. Osservando la Tabella 7 si può notare che i primi 6 tratti del Cordevole siano quelli con l'alveo pre-evento più stretto, infatti anche osservando i dati in Tabella A5, si nota che la maggior parte dei valori maggiori del 100% per la R_{FDM} risultino essere associati ai primi tratti del torrente. Il valore massimo raggiunto dal R_{FDM} è del 295%, ottenuto nella sponda destra del primo tratto.

La Figura 22, successiva, prende in esame invece la FDE.

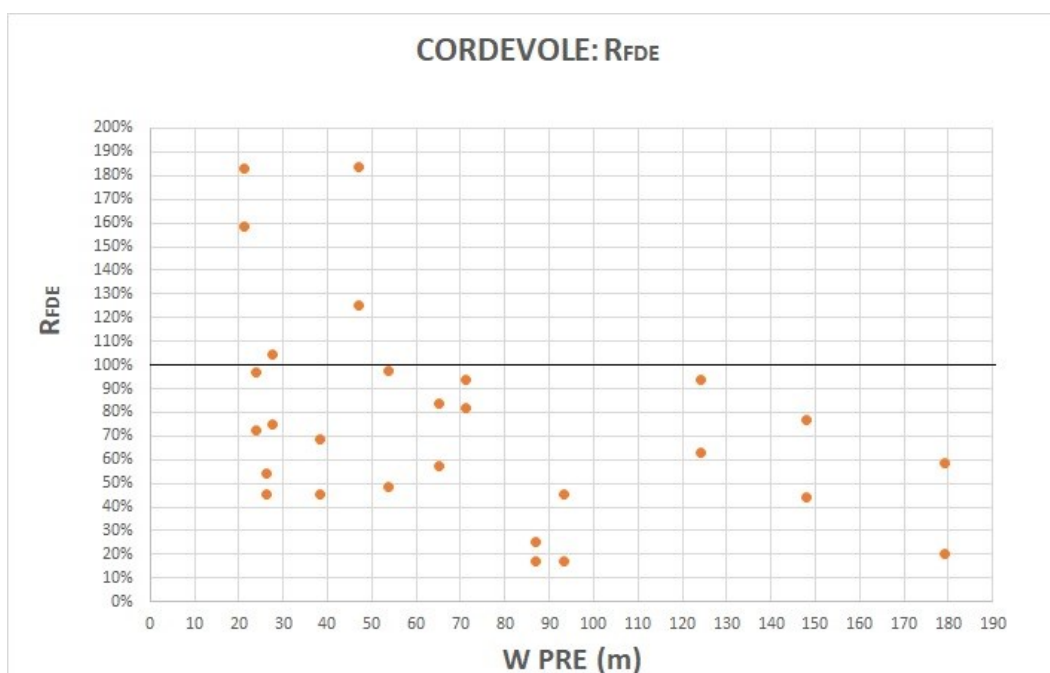


Figura 22: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per il Cordevole.

Dal grafico in Figura 22, si può notare come solo in 5 casi su 28, ovvero il 18% (mentre per l'FDM sono 13 su 28) l'erosione massima sia andata oltre i limiti della FDE, con anche percentuali minori rispetto alla FDM, in quanto per la FDE si registra un valore massimo dell' R_{FDE} del 183% (mentre per l'FDM si è raggiunto il valore del 295%) in due casi, nel tratto 2 e nel tratto 4 entrambi sulla sponda sinistra (Tabella A5). Anche in questo caso i valori superiori al 100% corrispondono ai tratti in cui l'alveo del Cordevole risulta avere una larghezza inferiore. Per l'FDE questo sembra verificarsi per alvei con larghezze inferiori a circa 50 metri. Oltre alle FFDM, è stata presa in considerazione, nelle medesime modalità, anche la pianura alluvionale, considerandola come una sorta di "fascia" più estesa delle precedenti. Nel seguente grafico vengono riportati i risultati riguardanti la pianura alluvionale.

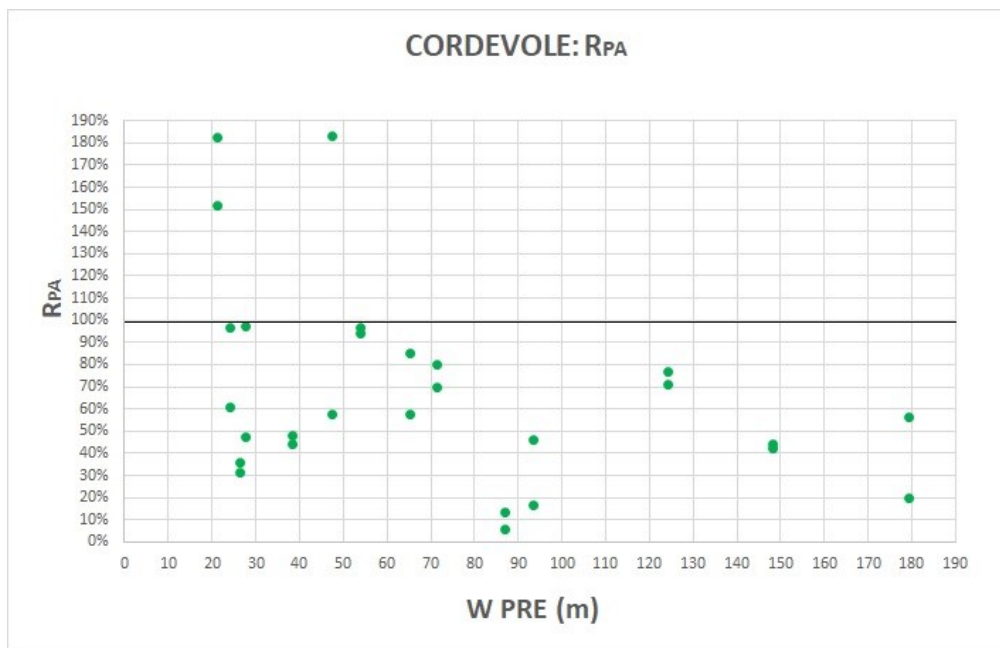


Figura 23: Relazione tra R_{PA} e W_{PRE} per il Cordevole.

Solo in 3 casi su 28 (circa l'11%) gli allargamenti massimi prodotti dalla Tempesta Vaia sono andati oltre i limiti della pianura alluvionale, andando ad erodere i versanti. I due valori massimi sono del 183% (Tabella A5) e corrispondono ai medesimi valori massimi riscontrati per la FDE (sponda sinistra dei tratti 2 e 4). Questo significa che in quei punti FDE e pianura alluvionale coincidono. Anche in questo caso i valori maggiori del 100% sono riscontrati negli alvei di minori dimensioni (minori di circa 50 metri).

Da questi ultimi tre grafici si può intuire come all'aumentare della superficie delle fasce, risulti meno probabile che un arretramento di grandi dimensioni possa andare oltre i confini delle fasce. Le fasce non riescono a prevedere quelle situazioni in cui l'erosione va ad interessare i versanti. Inoltre, questo avviene, sembrerebbe, più frequentemente al diminuire della larghezza dell'alveo (larghezza pre-evento).

La Figura 24, invece, sostituisce alla larghezza dell'alveo pre-evento con la portata di picco unitaria. Inoltre, invece di avere un grafico separato per ogni fascia, si è preferito raggruppare tutto nel medesimo grafico a dispersione.

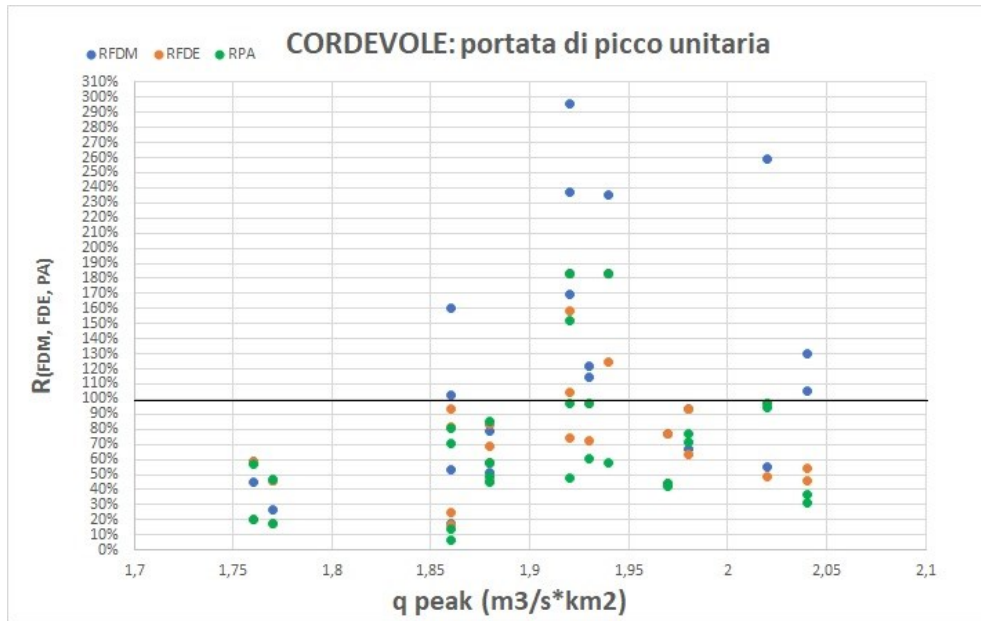


Figura 24: Relazione tra R_{FDM} , R_{FDE} e R_{PA} con il q_{peak}

Per la FDM, i valori maggiori del 100% risultano essere associati a valori della portata di picco unitaria superiori ad $1,85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$, con valori superiori al 100% corrispondenti anche alle portate maggiori, le quali sono di poco inferiori a $2,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$. Mentre per la FDE e la pianura alluvionale, i valori oltre il 100% si ritrovano solo in un certo intervallo dei valori di portata di picco unitari, cioè tra $1,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ e $1,95 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$, non comprendendo quindi i tratti in cui la portata è risultata essere maggiore.

Il Cordevole, si ricorda, è un corso d'acqua che, seppur in alveo montano, raggiunge discrete dimensioni. Mentre i quattro tributari, Liera, Corpassa, Tegnass e Pettorina, sono di dimensioni molto inferiori al Cordevole, e presentano caratteristiche diverse per quanto riguarda, ad esempio, il grado di confinamento e la pendenza dell'alveo. Risulta quindi interessante poter verificare se, con la medesima analisi compiuta per il Cordevole, si evidenziano comportamenti differenti nei quattro affluenti.

Di seguito vengono quindi riportati i risultati ottenuti sui quattro tributari.

TEGNAS		
Tratto	W_{PRE} (m)	q_{peak} ($m^3/s \cdot km^2$)
1	18	3,09
2	20	3,46
3	5	3,47
4	35	3,48
5	9	3,46
6	8	3,42
7	9	3,42
8	4	4,3
LIERA		
Tratto	W_{PRE} (m)	q_{peak} ($m^3/s \cdot km^2$)
1	-	-
2	9	1,79
3	3	1,92
4	3	2,26
5	5	2,58
6	6	2,70
7	4	2,74
PETTORINA		
Tratto	W_{PRE} (m)	q_{peak} ($m^3/s \cdot km^2$)
1	-	-
2	7	2,26
3	3	2,26
4	5	2,4
5	10	2,4
6	14	2,3
CORPASSA		
Tratto	W_{PRE} (m)	q_{peak} ($m^3/s \cdot km^2$)
1	27	1,20
2	14	1,20
3	12	1,18

Tabella 8: W_{PRE} e q_{peak} per il Tegnás, il Liera, il Pettorina e il Corpassa

Il Tegnás presenta una notevole variabilità nella larghezza dell'alveo pre-evento, con valori che vanno dai 4 metri dell'ultimo tratto, fino ai 35 metri del tratto 4. Inoltre, presenta la portata di picco unitaria maggiore di tutti e cinque i corsi d'acqua considerati, con valori tra il $3,09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ e il $4,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$.

Il Liera, contrariamente al Tegnás, presenta un alveo pre-evento di dimensioni inferiori e più omogenee, con un alveo che va dai 4 ai 9 metri di larghezza. Anche la q_{peak} è inferiore, con valori tra $1,79 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ e $2,74 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$. Si ricorda, però, che il Liera ha subito, in proporzione, i maggiori allargamenti dovuti a Vaia.

Il Pettorina presenta una W_{PRE} tra i 3 e i 14 metri, e una q_{peak} piuttosto omogenea tra i $2,26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ e $2,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$.

Il Corpassa presenta un alveo pre-evento che diminuisce le sue dimensioni lungo il suo percorso, e la portata di picco unitaria minore dei corsi d'acqua considerati con valori compresi tra $1,18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ e $1,20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$.

Analogamente a quanto fatto per il Cordevole, la tabella che raccoglie gli indici percentuali dei tributari (Tabella A6), è stata posta nel capitolo 8 (Appendice).

Come avvenuto per il Cordevole, innanzitutto, verrà illustrato il confronto tra gli indici percentuali e la W_{PRE} , e a seguire il confronto con il q_{peak} .

In ogni grafico verranno presi in considerazione, contemporaneamente, tutti e quattro i tributari, identificati graficamente da simboli diversi.

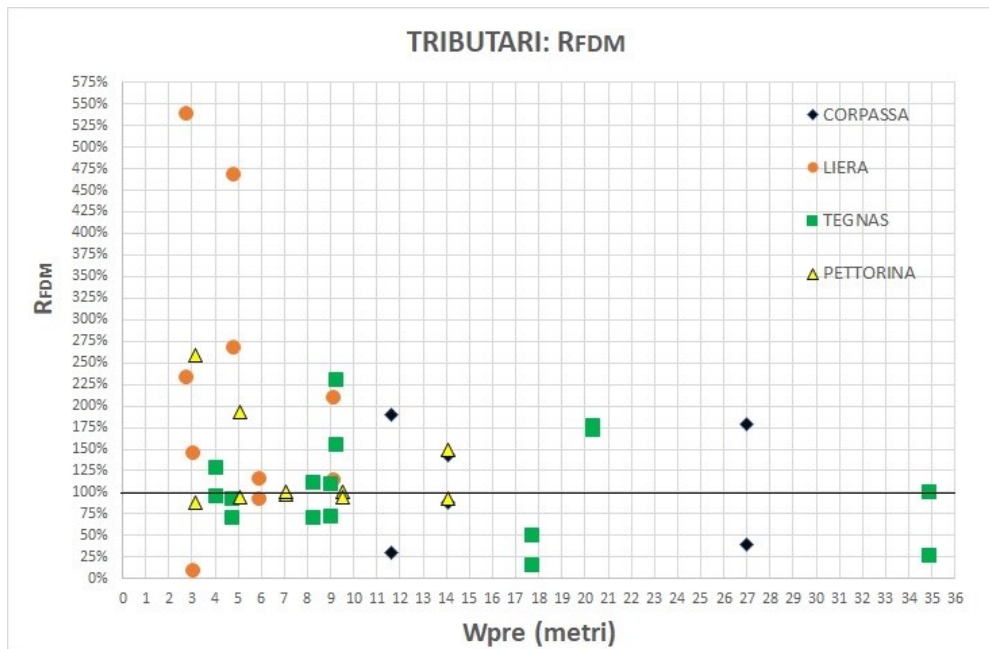


Figura 25: Relazione tra R_{FDM} e W_{PRE} per i quattro tributari.

Poco più della metà dei valori dell' R_{FDM} risulta essere maggiore del 100% con il Tegnass che presenta valori oltre la soglia del 100% in 7 casi su 16, il Liera con 9 su 11, il Pettorina con 4 su 12 e il Corpassa 3 su 6. Quindi, per un totale di 45 casi, ben 23 risultano oltre il 100% (il 51% contro il 46% del Cordevole). I valori massimi sono: 231% per il Tegnass, 540% per il Liera (valore massimo in assoluti di tutti i corsi d'acqua considerati), 258% per il Pettorina e 190% per il Corpassa.

Al contrario del Cordevole, dove sembrerebbe esserci una relazione tra la diminuzione della larghezza dell'alveo pre-evento e l'aumento della percentuale dell' R_{FDM} , per quanto riguarda i tributari, per nessuno di essi sembra verificarsi questa relazione, con valori superiori al 100% per tutte le varie larghezze degli alvei pre-evento.

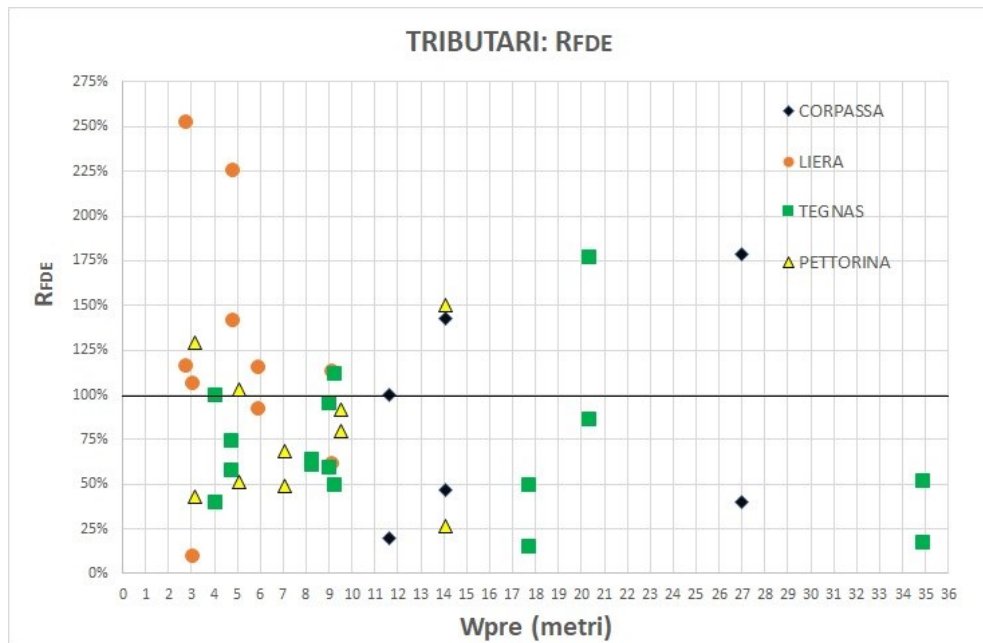


Figura 26: Relazione tra R_{FDE} e W_{PRE} per i quattro tributari.

Analogamente a quanto visto con la FDM (Figura 25), non sembra esserci una relazione chiara tra il diminuire della W_{PRE} e l'aumentare della R_{FDE} . Si può notare però che, a parte per il Liera, vi è una notevole diminuzione dei valori oltre il 100%, con anche una diminuzione dei valori massimi. Per il Tegnass, infatti, si hanno solo 2 valori su 16 oltre il 100%, per il Pettorina 4 su 12, il Corpassa 2 su 6, mentre il Liera presenta ancora valori per la maggior parte oltre il 100% con 7 su 11. I valori massimi sono: per il Tegnass 177%, Liera 226%, Pettorina 150% e Corpassa 179%. Quindi i valori oltre il 100% si sono presentati in 15 casi su 45, ovvero il 33%, contro il 51% per la FDM, mentre per l' R_{FDE} del Cordevole era il 18%. La Figura 27, l'ultima che prende in considerazione la W_{PRE} , riguarda le pianure alluvionali dei tributari.

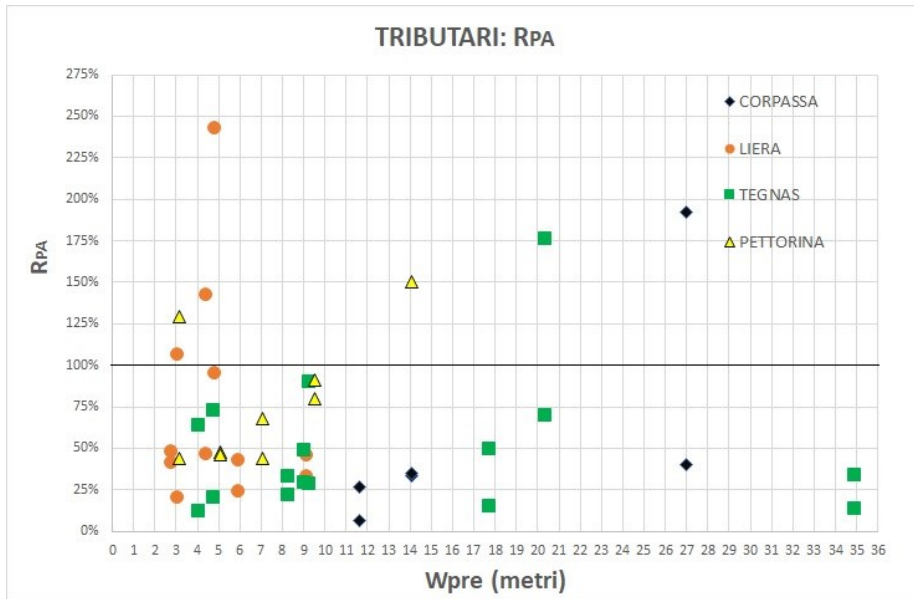
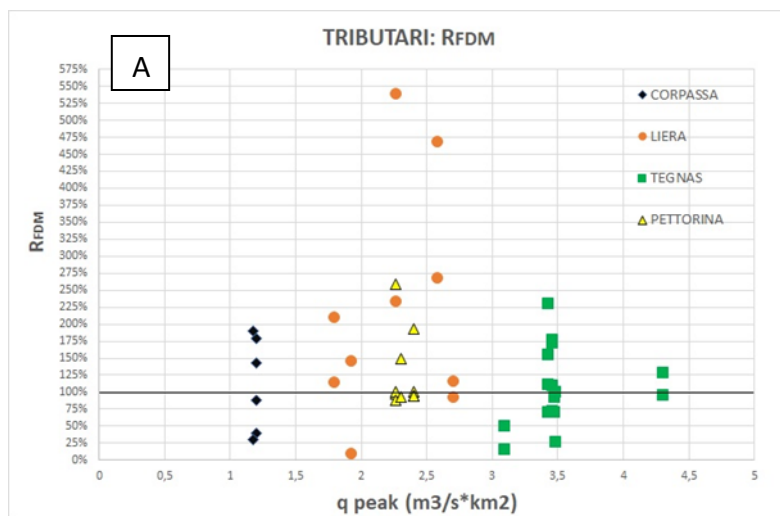


Figura 27: Relazione tra R_{PA} e W_{PRE} per i quattro tributari.

In 7 casi su 45 (il 15%, per il Cordevole 11%) l'erosione massima ha interessato i versanti andando oltre i limiti della piana alluvionale. Tre di essi si sono verificati nel Liera, che conferma il fatto di essere il corso d'acqua maggiormente interessato dagli effetti di Vaia, 2 per il Pettorina e uno per Tegnass e Corpassa. Il valore massimo ottenuto è del 243% per la sponda sinistra del quinto tratto del Liera (Tabella A6). Anche in questo caso non vi sembra esserci una correlazione tra la diminuzione della W_{PRE} e l'aumento dell'indice percentuale, in questo caso la R_{PA} . Il maggior numero di episodi di erosione dei versanti rispetto al Cordevole può essere spiegato con le minori dimensioni dei tributari e con un grado di confinamento maggiore rispetto al corso d'acqua principale, il quale fa sì che i versanti siano più vicini all'alveo attivo del corso d'acqua.

Come avvenuto per il Cordevole, la stessa analisi è stata effettuata ponendo nell'asse delle ascisse dei grafici il valore della portata di picco unitaria (q_{peak}). I tre grafici ottenuti sono stati raggruppati nella seguente Figura 28.



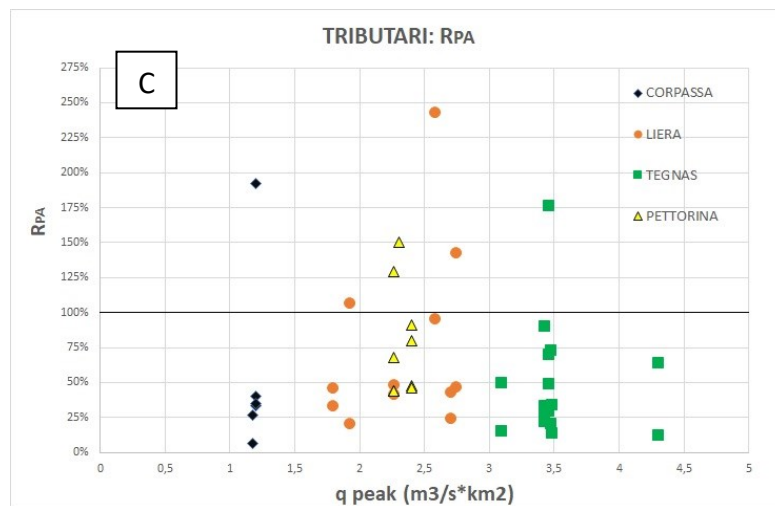
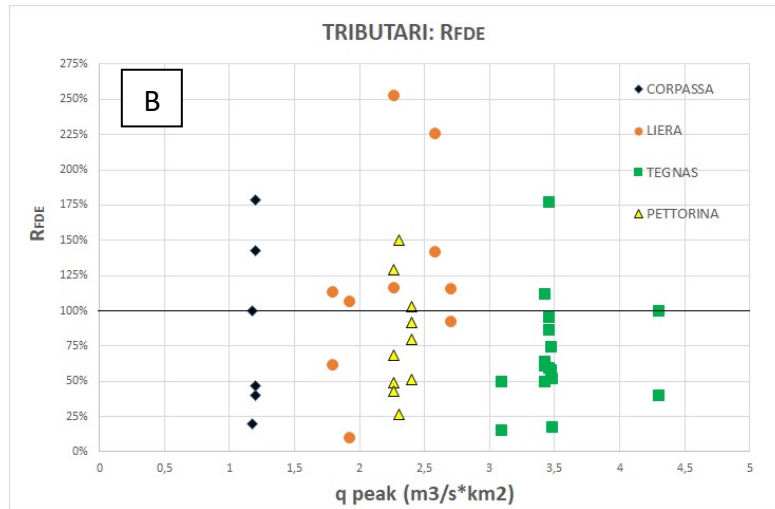


Figura 28: Relazione tra q_{peak} e: a) R_{FDM} , b) R_{FDE} , c) R_{PA} .

In tutti e tre i grafici in Figura 28, non si nota nessuna possibile correlazione significativa tra portata di picco unitaria e l'aumento dei valori degli indici percentuali. Infatti, in tutti e quattro i corsi d'acqua, per gli stessi valori di portata, il valore dell'indice "R" considerato può avere valori bassi ed inferiori al 100% e valori oltre questa soglia. L'unica differenza nei tre grafici è data dal numero di valori oltre il 100%.

7.DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dopo il lavoro di costruzione delle due FFDM, e le analisi compiute su di esse per testarne l'efficacia nel prevedere gli allargamenti degli alvei causati da un evento ad elevata magnitudo come Vaia, è emerso che dal punto di vista areale le fasce sono sempre risultate avere una superficie maggiore dell'alveo post-Vaia del 2018, in tutti i tratti analizzati. Trovare uno o più tratti in cui l'alveo post-evento fosse di superficie maggiore rispetto all'area delle fasce avrebbe significato che le fasce non sono sufficientemente cautelative oppure che nel tratto in esame si è verificato un allargamento significativo della pianura alluvionale, ossia una significativa erosione dei versanti.

Per quanto riguarda la capacità delle fasce di prevedere gli arretramenti massimi causati dall'evento, la FDE risulta essere sempre più efficace rispetto alla FDM, in quanto risulta essere più estesa e quindi più "capace" di contenere al suo interno gli allargamenti degli alvei. Si ricorda che la metodologia per la costruzione della FDE (Fascia di Dinamica di Evento) è stata sviluppata, appunto, coprendo un arco temporale maggiore in modo da poter risultare efficace nel prevedere gli effetti di eventi di elevata magnitudo come Vaia, mentre la FDM cerca di prevedere soprattutto il normale allargamento degli alvei, causato da eventi di piena più frequenti e di minore magnitudo.

Le fasce sono risultate più in grado di prevedere gli arretramenti massimi nel Cordevole, rispetto ai quattro tributari (vedasi Tabella A5 e A6) con sempre la FDE più efficace delle FDM. Questa differenza è molto probabilmente dovuta alle minori dimensioni dei tributari rispetto al Cordevole. Infatti, come affermato nel manuale IDRAIM (Rinaldi et al., 2014) e ripreso nel capitolo 5 dei Materiali e Metodi, per alvei di piccole dimensioni e con pendenza maggiore dell'1% come i quattro affluenti del Cordevole considerati, l'applicazione delle fasce risulta molto più difficoltosa, e anche la loro efficacia risulta essere compromessa, rendendo necessario considerare l'intera pianura alluvionale per delimitare la FFDM. A conferma di questa inefficacia delle fasce per gli alvei di piccole dimensioni, nel Cordevole si è visto come al diminuire dell'ampiezza dell'alveo pre-evento, le fasce, soprattutto la FDM, perdessero di efficacia nel prevedere gli arretramenti massimi (Figura 21 e 22).

L'analisi di una possibile relazione tra la portata di picco unitaria, ed erosione massima causata da Vaia, non ha portato a significativi risultati, in quanto per i tributari non è stata rilevata nessuna relazione (Figura 28), mentre per il Cordevole sembra esserci una soglia al di sopra della quale sono avvenuti gli allargamenti massimi che sono andati oltre la FDM e un range di valori della portata di picco unitaria in cui la stessa cosa si è verificata per la FDE (Figura 24). Questa relazione risulta comunque meno evidente rispetto alla precedente con la larghezza dell'alveo pre-evento. In ogni caso, essendo i limiti della pianura alluvionale i confini massimi possibili per le fasce, nei casi in cui l'erosione abbia intaccato i versanti, uscendo quindi dalla pianura, le fasce non possono in alcun modo prevedere tali tipi di allargamenti. Questo avviene soprattutto per alvei molto confinati, come ad esempio i tributari, con una pianura alluvionale di ridotte dimensioni, e quindi con i versanti molto vicini all'alveo, aumentando così la

probabilità che, in caso di un evento ad alta magnitudo, l'erosione interessi i versanti e comporti quindi un allargamento della pianura alluvionale.

La metodologia per la costruzione delle fasce è risultata quasi sempre facile nell'applicazione per la costruzione di quest'ultime. Le difficoltà maggiori sono state riscontrate nell'utilizzo delle foto del volo Gai (1954) e della cartografia di inizio XX secolo, per la digitalizzazione degli alvei storici. La scarsa risoluzione delle immagini aeree, unita alle difficoltà nella georeferenziazione delle immagini, fa sì che gli shape file di quegli alvei possano presentare alcuni errori. Inoltre, a differenza delle immagini più recenti, esse potrebbero essere difficili da reperire. In caso di difficoltà nell'utilizzo delle immagini più antiche, si potrebbe testare se l'efficacia delle fasce risulta compromessa senza l'utilizzo dei due alvei più antichi.

In conclusione, le Fasce Fluviali di Dinamica Morfologica sono uno strumento utile ed efficace nella previsione degli allargamenti massimi dell'alveo indotti da eventi ad alta magnitudo come la tempesta Vaia per dei corsi d'acqua montani di grandi dimensioni come il Cordevole. Al contrario, in corsi d'acqua piccoli e confinati risulta più opportuno considerare l'intera pianura alluvionale quale area potenzialmente interessata dalla dinamica geomorfologica. Bisogna considerare, comunque, che è proprio attorno a corsi d'acqua di dimensioni maggiori che nei territori montani si sviluppano i maggiori insediamenti umani e sono presenti le più importanti infrastrutture ed attività antropiche. Inoltre, le fasce in futuro potrebbero diventare uno strumento che permette di identificare delle aree in cui applicare dei vincoli o restrizioni per prevenire i danni causati da un evento intenso (ricordando che l'FDM risulta meno estesa della FDE). Oppure, nel caso in cui le previsioni meteo dovessero prevedere un evento estremo, le aree all'interno delle fasce potrebbero prevedere dei piani per la messa in sicurezza delle persone e dei manufatti.

8.APPENDICE

CORDEVOLE			
TRATTO	AREA (m²)	LUNGHEZZA (m)	LARGHEZZA MEDIA (m)
1	214725	2186	98
2	105198	1846	57
3	341453	2211	154
4	229759	1214	189
5	737117	2663	277
6	309026	5508	56
7	373176	2296	163
8	434387	1527	285
9	2911690	7422	392
10	461976	1639	282
11	304421	3809	80
12	842579	1446	583
13	919078	1594	577
14	1672425	2483	674
15	5148971	3165	1627

Tabella A1: Dimensioni dei tratti del Cordevole.

TEGNAS			
TRATTO	AREA (m²)	LUNGHEZZA (m)	LARGHEZZA MEDIA (m)
1	19587	580	34
2	92642	2275	41
3	487893	1704	286
4	25214	617	41
5	611661	1906	321
6	75856	825	92
7	207715	1621	128
8	148363	965	154
LIERA			
TRATTO	AREA (m²)	LUNGHEZZA (m)	LARGHEZZA MEDIA (m)
1	8634	166	52
2	272406	1158	235
3	69581	899	77
4	401277	2053	195
5	179375	2136	84
6	300314	1783	168
7	26727	752	36
PETTORINA			
TRATTO	AREA (m²)	LUNGHEZZA (m)	LARGHEZZA MEDIA (m)
1	4638	183	25
2	175869	2170	81
3	42505	1514	28

4	294311	2239	131
5	133182	2626	51
6	117679	736	160
CORPASSA			
TRATTO	AREA (m ²)	LUNGHEZZA (m)	LARGHEZZA MEDIA (m)
1	246477	3372	73
2	34600	765	45
3	79882	330	242

Tabella A2: Dimensioni dei tratti dei quattro tributari.

CORDEVOLE					
TRATTO	Area alveo 2015	Area alveo post-Vaia	Area FDM	Area FDE	Area Piana
1	67407	141398,7	145216	241572	287289
2	39860	77343,07	86422	95051	105198
3	58372	96100,12	150368	228829	341453
4	33988	59002,65	62043	105112	229759
5	132510	213035,7	272478	479691	737117
6	151201	234996,5	296823	308244	309026
7	116868	233632,5	324976	356776	373176
8	240052	277393	434017	437248	434387
9	1326464	1534574	2815624	2908993	2911690
10	116963	134735,5	269956	311453	461976
11	148388	202071,6	255088	284024	304421
12	106252	140772	373149	548960	842579
13	150543	166179,7	609042	832216	919078
14	245684	456272,5	1274943	1583464	1672425
15	653036	735342,4	1623787	2323116	5148971

Tabella A3: Aree degli alvei pre e post Vaia, delle fasce e della pianura alluvionale per il Cordevole.

TEGNAS					
TRATTO	Area alveo 2015	Area alveo post-Vaia	Area FDM	Area FDE	Area Piana
1	10080	717	19323	19942	19587
2	39550	68491	84987	92042	92642
3	35348	78689	184150	260326	487893
4	2943	21176	14919	22734	25214
5	66198	98897	194607	281914	611661
6	7411	19462	40975	55437	75856
7	13347	48848	67554	100458	207715
8	8940	31387	40586	86949	148363

LIERA					
TRATTO	Area alveo 2015	Area alveo post-Vaia	Area FDM	Area FDE	Area Piana
1	908	1305	5392	8928	8634
2	10779	23570	52712	98289	272406
3	2717	8006	30381	54121	69581
4	5819	41068	73115	135506	401277
5	10198	65263	80190	122446	179375
6	10658	61973	71954	119430	300314
7	3224	13352	13736	19828	26727
PETTORINA					
TRATTO	Area alveo 2015	Area alveo post-Vaia	Area FDM	Area FDE	Area Piana
1	868	1601	4086	4810	4638
2	17772	39019	98933	136381	175869
3	4765	18305	31259	40763	42505
4	11537	62306	71596	203690	294311
5	29216	60644	118392	131956	133182
6	10371	14971	22143	59110	117679
CORPASSA					
TRATTO	Area alveo 2015	Area alveo post-Vaia	Area FDM	Area FDE	Area Piana
1	104709	91442	228091	246025	246477
2	11642	13799	26034	31761	34600
3	2692	4531	11778	14285	79882

Tabella A4: Aree degli alvei pre e post Vaia, delle fasce e della pianura alluvionale dei quattro tributari.

CORDEVOLE						
Tratto	R_{FDM} D	R_{FDM} S	R_{FDE} D	R_{FDE} S	R_{PA} D	R_{PA} S
1	295%	169%	75%	105%	48%	97%
2	238%	183%	158%	183%	152%	183%
3	122%	115%	97%	72%	97%	61%
4	235%	183%	125%	183%	58%	183%
5	130%	105%	46%	54%	32%	36%
6	109%	130%	97%	95%	95%	97%
7	94%	67%	94%	63%	77%	71%
8	77%	44%	77%	44%	44%	43%
9	58%	84%	58%	84%	58%	86%
10	51%	52%	46%	46%	45%	49%
11	100%	161%	75%	94%	80%	70%
12	17%	53%	17%	25%	6%	14%
13	45%	26%	45%	17%	47%	17%
14	45%	58%	20%	58%	20%	57%
15	46%	23%	23%	22%	7%	6%

Tabella A5: Indici percentuali derivanti dai rapporti tra l'erosione massima di Vaia e le ampiezze delle fasce e della piana alluvionale nel medesimo punto per il Cordevole.

TEGNAS						
Tratto	R_{FDM} D	R_{FDM} S	R_{FDE} D	R_{FDE} S	R_{PA} D	R_{PA} S
1	50%	15%	50%	15%	50%	15%
2	173%	177%	87%	177%	70%	177%
3	94%	71%	75%	58%	73%	21%
4	28%	100%	18%	52%	14%	34%
5	110%	73%	96%	59%	49%	30%
6	71%	112%	64%	61%	33%	22%
7	231%	156%	112%	50%	29%	90%
8	129%	96%	100%	40%	64%	13%
LIERA						
Tratto	R_{FDM} D	R_{FDM} S	R_{FDE} D	R_{FDE} S	R_{PA} D	R_{PA} S
1	136%	-	63%	-	58%	-
2	115%	210%	62%	114%	46%	34%
3	145%	10%	107%	10%	107%	21%
4	233%	540%	117%	253%	42%	48%
5	469%	268%	226%	142%	95%	243%
6	116%	93%	116%	93%	43%	25%
7	-	-	-	-	143%	47%
PETTORINA						
Tratto	R_{FDM} D	R_{FDM} S	R_{FDE} D	R_{FDE} S	R_{PA} D	R_{PA} S
1	142%	25%	113%	25%	106%	25%
2	98%	100%	69%	49%	68%	44%
3	258%	88%	129%	43%	129%	44%
4	194%	94%	103%	52%	46%	48%
5	100%	94%	80%	91%	80%	91%
6	150%	93%	150%	26%	150%	-
CORPASSA						
Tratto	R_{FDM} D	R_{FDM} S	R_{FDE} D	R_{FDE} S	R_{PA} D	R_{PA} S

1	40%	179%	40%	179%	40%	179%
2	89%	143%	47%	143%	35%	33%
3	31%	190%	20%	100%	27%	7%

Tabella A6: Indici percentuali derivanti dai rapporti tra l'erosione massima di Vaia e le ampiezze delle fasce e della piana alluvionale nel medesimo punto per i tributari.

9. BIBLIOGRAFIA

Baruffi F., Rusconi A., Surian N., 2004. "Le fasce di pertinenza fluviale nella pianificazione dei bacini idrografici: aspetti metodologici e applicazioni". Internationales Symposium Interpraevent 2004- Riva/Trient.

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 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108650>

Chirici G, Giannetti F, Travaglini D, Nocentini S, Francini S, D'Amico G, Calvo E, Fasolini D, Broll M, Maistrelli F, Tonner J, Pietrogiovanna M, Oberlechner K, Andriolo A, Comino R, Faidiga A, Pasutto I, Carraro G, Zen S, Contarin F, Alfonsi L, Wolynski A, Zanin M, Gagliano C, Tonolli S, Zoanetti R, Tonetti R, Cavalli R, Lingua E, Pirotti F, Grigolato S, Bellingeri D, Zini E, Gianelle D, Dalponte M, Pompei E, Stefani A, Motta R, Morresi D, Garbarino M, Alberti G, Valdevit F, Tomelleri E, Torresani M, Tonon G, Marchi M, Corona P, Marchetti M., 2019. "Stima dei danni della tempesta "Vaia" alle foreste in Italia". *Forest@, rivista di Selvicoltura e Ecologia Forestale. Rapporti tecnici*, vol. 16, pp. 3-9.
<https://dx.doi.org/10.3832/efor3070-016>

Davolio S., Della Fera S., Laviola S., Miglietta M. M., Levizzani V., 2020. "Heavy Precipitation over Italy from the Mediterranean Storm "Vaia" in October 2018: Assessing the Role of an Atmospheric River". AMS (American Meteorological Society), *Monthly Weather Review*, Volume 148: Issue 9.
<https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0021.1>

Giovannini L., Davolio S., Zaramella M., Zardi D., Borg, M., 2021. "Multi-model convection-resolving simulations of the October 2018 Vaia storm over Northeastern Italy". *Atmos. Res.* 253, 105455.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105455>

Govi M., Turitto O., 1994. "Problemi di riconoscimento delle fasce di pertinenza fluviale". In: IV Convegno Internazionale di Geoingegneria "Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi", Torino, 10-11 marzo 1994, 161-172.

Lagasse P.F., Zevenbergen L.V., Spitz W.J., Thorne C.R. 2004. "Methodology for Predicting Channel Migration". National Cooperative Highway Research Program, Web-Only, Document 67 (Project 24-16).

Liébault F., Piégay H. 2002. "Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France". *Earth Surf. Proc. Land*.
<https://doi.org/10.1002/esp.328>,

Rigon, E., Moretto, J., Rainato, R., Lenzi, M. A., Zorzi, A., 2013. "Evaluation of the morphological quality index in the Cordevole river (Bl, Italy)", *Journal of Agricultural Engineering*, 44(3), p. e15.

<https://doi.org/10.4081/jae.2013.e15>

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2014. "IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – ISPRA – ". *Manuali e Linee Guida 113/2014*. Roma, giugno 2014.

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2015. "A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management". *Geomorphology* 251 (2015) 122-136.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.010>

Schumm S.A., 1977. "The Fluvial System". Wiley, New York.

Vianello A., Andrich A., Cremonese S. M., De Bona A., Egiatti G., Marmolada D., Viel A., 2019. "Livelli e portate medie giornaliere del Torrente Cordevole a Ponte Mas negli 2003-2018". ARPAV

RIGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento al Professor Nicola Surian e al Dottor Andrea Brenna, per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro di tesi con loro, e di avermi sempre supportato ed aiutato in questi mesi. Oltre ad avermi fornito il materiale per eseguire al meglio questo lavoro.

Ringrazio tutti coloro che hanno partecipato alla stesura della metodologia delle Fasce Fluviali di Dinamica Morfologica per ISPRA e agli altri lavori citati in questa tesi.

Ringrazio la Biblioteca di Ca' Bordin di Padova per avermi fornito le scansioni della cartografia di inizio 1900.

Ringrazio i compagni di corso della magistrale per avermi accolto e fatto divertire in questi due meravigliosi anni, permettendomi di vivere al meglio questa esperienza.

Ringrazio i miei genitori per avermi aiutato nel momento del bisogno e per avermi permesso di compiere questi studi nella maniera migliore.

Ringrazio l'amica Sofia, per avermi fatto compagnia in questi mesi di lavoro e stesura della tesi, tra un'aula studio e una biblioteca, permettendomi di lavorare al meglio.

Infine, ringrazio Diletta, per essermi stata vicino durante gli anni della magistrale e della triennale, interessandosi al mio percorso e supportandomi durante gli esami e durante il periodo di tesi, stimolandomi a dare il meglio di me. Avere qualcuno a cui raccontare la propria esperienza universitaria, a mio avviso, rappresenta una fonte di energia incredibile per percorrere questo cammino, il quale a volte può presentare ardue sfide da superare. Grazie di cuore Diletta.