

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio

Variazioni morfologiche di medio periodo lungo un tratto del Fiume Piave (Nogarè, BL)

Relatore:

Prof. Picco Lorenzo

Correlatore:

Dott. Pellegrini Giacomo

Laureando:

Leonardo Zoccoletto

Matricola n.

2032799

Anno accademico 2023/2024

Ai miei genitori

Indice

Riassunto	I
Abstract	III
1 Introduzione	1
1.1 Parametri fluviomorfologici per la descrizione degli alvei	4
1.2 La composizione del sistema fluviale	6
1.3 La classificazione dei sistemi fluviali	11
1.3.1 La classificazione di Billi (1994)	13
1.4 L'impiego della tecnologia LiDAR	19
1.4.1 Il monitoraggio indiretto delle forme fluviali	21
2 Obiettivi	23
3 Materiali e metodi	25
3.1 Area di studio	25
3.2 Caratterizzazione idrologica	27
3.3 Analisi fotointerpretativa multitemporale da ortofoto	28
3.3.1 Procedimento dell'analisi fotointerpretativa multitemporale	28
3.4 Analisi mediante DoD	29
3.4.1 Estrazione dei DoD mediante GCD e gestione dell'errore	29
3.4.2 Dati LiDAR	31
3.4.3 Parametri considerati nei DoD	32
4 Risultati	35
4.1 Risultati ottenuti mediante analisi fotointerpretativa multitemporale	35

4.1.1	Analisi fotointerpretativa nel sottotratto A1 per il 2011, 2015 e 2023	35
4.1.2	Confronto dei risultati ottenuti nel sottotratto A1	39
4.1.3	Analisi fotointerpretativa nel sottotratto A2 per il 2011, 2015 e 2023	40
4.1.4	Riassunto dei risultati ottenuti nel sottotratto A2	44
4.1.5	Analisi fotointerpretativa nel sottotratto A3 per il 2011, 2015 e 2023	46
4.1.6	Confronto dei risultati ottenuti nel sottotratto A3	49
4.2	Risultati ottenuti mediante DoD	51
4.2.1	Risultati per il sottotratto A1	51
4.2.2	Risultati per il sottotratto A2	56
4.2.3	Risultati per il sottotratto A3	62
5	Discussioni	69
6	Conclusioni	73
	Bibliografia	75

Elenco delle tabelle

4.1	Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A1 . . .	39
4.2	Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A2 . . .	44
4.3	Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A3 . . .	49
4.4	Tabella riassuntiva per il sottotratto A1 ottenuta mediante GCD . . .	56
4.5	Tabella riassuntiva per il sottotratto A2 ottenuta mediante GCD . . .	61
4.6	Tabella riassuntiva per il sottotratto A3 ottenuta mediante GCD . . .	67

Elenco delle figure

1.1	Tipologie di trasporto solido - da materiale didattico corso "Design of sustainable and resilient measures against floods" (D'Agostino, 2023)	3
1.2	Interrelazione dei fenomeni che influenzano la morfologia fluviale - da materiale didattico, corso "Channel morphology, large wood and sediment fluxes in mountain rivers" (Lenzi, 2023)	4
1.3	Rappresentazione del comportamento del bacino	6
1.4	Ordinamento gerarchico delle unità (Fryirs et al., 2012)	7
1.5	Suddivisione del bacino in tratti ed individuazione delle unità idrauliche e geomorfologiche (Fryirs et al., 2012)	7
1.6	Principali tipologie di barre: 1) laterali; 2) di meandro; 3) di confluenza; 4) longitudinali; 5) a losanga; 6) diagonali; 7) dune di sabbia (Kellerhals et al., 1976)	8
1.7	Dinamica dei flussi in presenza di meandri (Fryirs et al., 2012)	10
1.8	Classificazione dei corsi d'acqua alluvionali (Schumm, 1977)	12
1.9	Schema delle configurazioni d'alveo (modificato da Billi et al. (1994)) estratto da Lenzi et al. (2000)	13
1.10	Corso d'acqua rettilineo (Lenzi, 2023)	14
1.11	Corso d'acqua a canali intrecciati (Lenzi, 2023)	15
1.12	Corso d'acqua pseudomeandriforme (Lenzi, 2023)	16
1.13	Corso d'acqua meandriforme (Lenzi, 2023)	16
1.14	Parametri A, L e R dei corsi d'acqua meandriformi (Lenzi, 2023)	17
1.15	Corso d'acqua anastomizzato (Lenzi, 2023)	18
1.16	Tipico sistema di laser scanning aereo (Roman et al., 2016)	19

1.17	Classificazione dei DEM: a) Regular grid, b) TIN, c) Contour structures (Masini et al., 2011)	20
1.18	Differenza tra DSM e DTM (Meza et al., 2019)	21
1.19	Schematizzazione del funzionamento dei DoD (Williams, 2012)	22
3.1	Bacino idrografico del Fiume Piave – da Piano di gestione dei bacini idrografici delle Alpi Orientali	25
3.2	Inquadramento da ortofoto dei sottotratti oggetto di studio	26
3.3	Idrogramma rappresentate i valori massimi mensili di portata liquida (m^3/s) registrati nel periodo intercorso tra 2011-2023	27
3.4	Piano di volo eseguito per il sottotratto A2	31
4.1	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2011	36
4.2	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2011	36
4.3	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2015	37
4.4	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2015	38
4.5	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2023	38
4.6	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2023	39
4.7	Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel 2011,2015 e 2023	40
4.8	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2011	41
4.9	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2011	41
4.10	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2015	42
4.11	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2015	42
4.12	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2023	43
4.13	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2023	44

4.14	Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel sottotratto A2	45
4.15	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2011	46
4.16	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2011	47
4.17	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2015	47
4.18	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2015	48
4.19	Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2023	48
4.20	Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2023	49
4.21	Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel sottotratto A3	50
4.22	Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A1 avvenuti tra il 2011 ed il 2023	51
4.23	Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A1 .	52
4.24	Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023	53
4.25	Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A1	53
4.26	Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023	54
4.27	Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.1	54
4.28	Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A1, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)" .	55
4.29	Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A2 avvenuti tra il 2011 ed il 2023	57
4.30	Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A2 .	57
4.31	Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023	58
4.32	Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A2	58

4.33	Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023	59
4.34	Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.2	59
4.35	Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A2, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)" .	60
4.36	Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A3 avvenuti tra il 2011 ed il 2023	62
4.37	Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A3 .	63
4.38	Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023	63
4.39	Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A3	64
4.40	Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023	64
4.41	Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.3	65
4.42	Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A3, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)" .	66

Riassunto

I corsi d'acqua rappresentano un elemento fortemente soggetto a variazioni, soprattutto se caratterizzati da un fondo mobile. Essi vengono condizionati in particolare modo dai differenti eventi di piena, e questo, comporta la variazione delle unità morfologiche che vanno a costituire il sistema fluviale. Si riscontra, poi, una forte variabilità ed efficacia in determinate intensità di portate. In particolare, la portata che più incide nelle dinamiche del canale attivo, è quella che riempie da riva a riva il canale, ovvero la portata a piene rive. Le analisi svolte nel presente studio hanno l'obiettivo di definire le variazioni morfologiche che hanno interessato tre sottotratti del Fiume Piave tra il 2011 ed il 2023, nelle vicinanze della località di Nogarè (BL), in riferimento a due principali eventi caratterizzati da regimi con valori al di sopra della portata a piene rive. Il primo evento si è verificato nel novembre del 2014 ed il secondo nell'ottobre del 2018, in corrispondenza della tempesta Vaia. La prima analisi, si è svolta mediante fotointerpretazione multitemporale da ortofoto, con l'impiego del software *ArcGIS Pro*, con il quale è stata eseguita la digitalizzazione delle unità morfologiche considerate, ovvero: barre nude, barre vegetate, isole, canali bagnati e piane alluvionali. La digitalizzazione è stata svolta per tre diversi periodi, ovvero per il 2011, il 2015 ed il 2023; così da conoscere la configurazione morfologica di ogni sottotratto prima e dopo gli eventi del 2014 e del 2018. Grazie a questo procedimento, è stato possibile individuare quali variazioni sono state prevalenti, in base a cambiamenti della superficie occupata dalla singola unità morfologica, ed è stata fornita una visione generale delle dinamiche che si sono susseguite dopo gli eventi. La seconda tipologia di analisi, di tipo morfologico-topografica, è stata svolta con l'impiego del software GCD (*Geomorphic Change Detection*). Questo software, attraverso un'elaborazione di DEM (*Digital Elevation Model*) permette di ottenere un DoD (*DEM of Difference*), ovvero una differenza tra modelli digitali di periodi

differenti. Sottraendo il modello più recente a quello più datato, si ottiene un terzo modello digitale nel quale vengono evidenziati i fenomeni di erosione e deposizione che si sono verificati. Per lo svolgimento di questa analisi sono stati presi in considerazione i DEM relativi al 2011 ed al 2023. Con questo metodo è possibile ottenere ed analizzare le variazioni complessive riscontrate tra i due periodi, evidenziando così i cambiamenti rispetto ad una situazione iniziale. È stato possibile poi, implementare l'analisi grazie ai differenti risultati numerici ottenuti, in particolare, sono stati analizzati i risultati volumetrici, areali e di quota all'interno dei sottotratti presi in esame. Infine, le due metodologie sono state integrate, sia per svolgere un confronto dei risultati ottenuti, che per comprendere in modo più preciso ed affidabile quanto accaduto all'interno dei sottotratti. Tali analisi permettono di meglio comprendere la dinamica dei corsi d'acqua a seguito di eventi ad elevata intensità, al fine di affrontare in maniera più adeguata eventuali criticità e favorire una gestione del corridoio fluviale più attento.

Abstract

Channel networks are highly variable, especially if characterized by a gravel bed. They are particularly affected by the different flood events, which leads to changes in the morphological units that constitute the river system. There is also a strong variability and effectiveness in certain flow intensities. In particular, the flow that most impacts the morphodynamics of the active channel is that which fills the channel from bank to bank, also called bankfull. The analyses carried out in this study aims to define the morphological changes that affected three subreaches of the Piave river between 2011 and 2023, near the village of Nogarè (BL), considering two events characterised by over bankfull levels. The first event took place in November 2014 and the second in October 2018 at the time of Vaia storm. The first analysis was carried out by means of multitemporal photo interpretation from orthophotos, using the *ArcGIS Pro* software, which facilitated the digitalization of the considered morphological units: bare bars, vegetated bars, islands, wet canals and flood plains. The digitalization was carried out for three different periods, that is for 2011, 2015 and 2023, to understand the morphological configuration of each subreaches before and after the events of 2014 and 2018. This procedure made it possible to identify which variations were prevalent based on changes in the surface occupied by each morphological unit, providing an overall view of the dynamics that followed the events. The second type of analysis, morphological-topographic, was carried out using the GCD software (*Geomorphic Change Detection*). This software, through a processing of DEM (*Digital Elevation Model*) allows to obtain a DoD (*DEM of Difference*), that is a difference between digital models of different periods. Subtracting the newer model from the older one, a third digital model is obtained in which the erosion and deposition phenomena that have occurred are highlighted. The DEM for 2011 and 2023 were used as reference for this analysis. This method allows the

assessment and analysis of the overall changes observed between the two periods, highlighting the shifts compared to an initial situation. The analysis was further enhanced by the different numerical results obtained, particularly the volumetric, areal and elevations results within the subreaches. Finally, the two methodologies were integrated, both to compare the results obtained and to gain a more precise and reliable understanding of what happened within the subreaches. Such analyses allow for a better understanding of the dynamics of watercourses following high-intensity events, aiming to address potential criticalities and promote more careful management of the river corridor.

CAPITOLO 1

Introduzione

Con il termine geomorfologia fluviale si intende “lo studio dei processi di produzione, flusso ed immagazzinamento di sedimenti nel bacino idrografico e nell’alveo fluviale nella breve, media e lunga scala, e delle forme risultanti nell’alveo e nella piana inondabile” (Newson et al., 1993). Il bacino idrografico e il sistema fluviale o reticolo idrografico presenti al suo interno, costituiscono il punto di partenza di qualunque analisi delle caratteristiche morfologiche e dell’evoluzione dei corsi d’acqua che sono presenti in esso (Rinaldi et al., 2014). La definizione elaborata da Newson & Sear (1993), tiene conto di un fattore molto importante, ovvero il tempo con il quale questi processi hanno agito. Le modifiche si verificano generalmente in tempi molto lunghi (scala dei tempi geologici) e queste trasformazioni sono state segnate da eventi di un’elevata magnitudo come azioni tettoniche, mutazioni climatiche e glaciazioni che hanno interessato vaste regioni (Lenzi et al., 2000). Oltre alla scala temporale, i processi avvengono su scale spaziali molto differenti, si possono verificare su grandi scale come la migrazione degli alvei, con variazioni di migliaia di chilometri, fino a piccole scale, come la variazione della planimetria dell’alveo (altezza e larghezza) o cambiamenti delle forme al suo interno (migrazione delle barre), quindi cambiamenti sull’ordine del metro. Tutte le modifiche alla struttura geomorfologica dei fiumi hanno enormi implicazioni per il funzionamento dei flussi biologici che influenzano il movimento dell’acqua, del sedimento e dei nutrienti (Fryirs et al., 2012). Un fattore che genera una forte pressione sulle forme fluviali è la portata, essa ha la caratteristica di essere molto variabile e perciò può agire in maniera più o meno

efficace, tuttavia a causa della sua variabilità è importante fare una distinzione tra le diverse portate che possono verificarsi all'interno di un alveo:

- Portata di magra: ha una durata prolungata, ma la cui entità è modesta, è la portata che influenza la geometria del letto di magra;
- Portata a “piene rive”: in letteratura anglosassone è detta “*bankfull*”, è la portata che “riempie” l'alveo da riva a riva, corrisponde alla portata avente un tempo di ritorno di 1-2 anni. È stata definita per la prima volta come “massima portata che può essere contenuta all'interno dell'alveo senza che superi le sponde” (Leopold et al., 1964);
- Portata formativa: responsabile della formazione della geometria della sezione trasversale dell'alveo;
- Portata dominante: portata rappresentativa di tutto l'insieme dei deflussi nei confronti di un particolare effetto di dinamica fluviale (trasporto solido, forma dell'alveo, geometria delle forme planimetriche).
- Portata efficace: comporta il massimo trasporto solido in un lungo periodo di tempo.

Come descritto, all'interno di un alveo possono transitare differenti livelli idrometrici, tuttavia Wolman et al. (1960) hanno indicato che gran parte del “lavoro” nell'influenzare le forme fluviali è svolto da eventi di moderata intensità che si ripetono con frequenza maggiore, rispetto ad eventi di elevata magnitudo che si verificano più raramente.

In relazione alla portata liquida, è necessario introdurre la portata solida. Quest'ultima indica la quantità di sedimento trasportato; il trasporto di sedimento può avvenire in diversi modi, a seconda della forza che la corrente esercita sui clasti e la dimensione di essi. Dato ciò, si divide il trasporto solido in (Figura 1.1):

- Trasporto di fondo: il materiale trasportato si muove a contatto con il fondo, ed è generalmente quello più grossolano;

- Saltazione: il materiale è leggermente più fino, e viene trasportato eseguendo dei piccoli salti sul fondo;
- Sospensione: nel caso di materiale leggero, viene trasportato senza che tocchi il fondo;
- Soluzione: quando le particelle sono disciolte in acqua;
- Galleggiamento: solitamente interessa il legname e i detriti derivanti da esso che vengono trasportati in superficie.



Figura 1.1: Tipologie di trasporto solido - da materiale didattico corso "Design of sustainable and resilient measures against floods" (D'Agostino, 2023)

Quindi, la produzione continua di sedimenti, associata a particolari condizioni ambientali (vegetazione, uso del suolo, pedologia ecc.) e soggetta all'azione di forze esterne di un'elevata magnitudo, agenti su scale temporali elevate, danno origine a diverse forme fluviali, le quali sono oggetto di studio della geomorfologia fluviale. Si tratta di un processo evolutivo, che è l'espressione di un equilibrio instabile tra i fattori che danno luogo al "sistema fluviale" (Lenzi et al., 2000). Quanto appena detto, è possibile osservarlo in modo più schematico nella figura seguente (Figura 1.2):

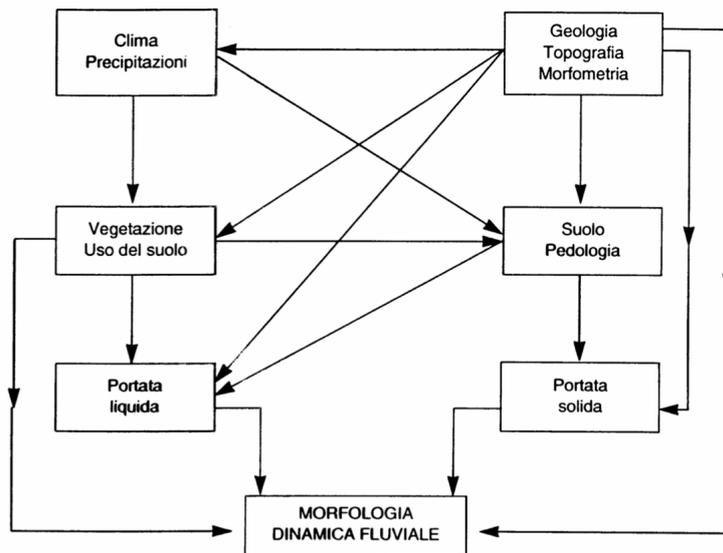


Figura 1.2: Interrelazione dei fenomeni che influenzano la morfologia fluviale - da materiale didattico, corso "Channel morphology, large wood and sediment fluxes in mountain rivers" (Lenzi, 2023)

1.1 Parametri fluviomorfologici per la descrizione degli alvei

Date le numerose configurazioni e caratteristiche che possiedono gli alvei, vengono utilizzati determinati parametri in modo da facilitare la loro comprensione e descrizione. Tali parametri verranno descritti di seguito.

Parametri geometrici:

- **Grado di intrecciamento:** permette di esprimere il numero di barre o isole in un determinato tratto in modo tale da poter distinguere alvei fluviali unicursali (singolo canale) da alvei fluviali pluricursali (molteplici canali). Viene solitamente espresso dal rapporto tra larghezza del collettore in condizioni di piena, quando le forme di fondo sono completamente sommerse, e dalla larghezza dello stesso in condizioni di flusso normale. Nel caso si sia in un alveo pluricursale, la larghezza deriva dalla somma delle larghezze dei vari canali (Lenzi et al., 2000).
- **Incassamento:** viene anche detto "grado di confinamento", valuta il grado di mobilità dell'alveo, ed è dato dal rapporto tra la larghezza dell'area d'esonda-

zione e la larghezza del pelo libero di una portata a piene rive (Rosgen, 1994; Rosgen, 1996; Kellerhals, 1972);

- Rapporto larghezza/profondità: esprime le dimensioni e il fattore di forma come il rapporto tra la larghezza del canale da riva a riva e la relativa profondità media (Rosgen, 1994);
- Sinuosità: è stata introdotta da Leopold et al. (1964) ed è data dal rapporto tra la lunghezza del corso d'acqua e la lunghezza dell'asse vallivo;
- Pendenza: è un elemento molto importante per la determinazione delle caratteristiche idrauliche, morfologiche e biologiche di un corso d'acqua.

Parametri idraulico-sedimentologici:

- Trasporto solido totale: viene determinato come somma del trasporto solido di fondo e del trasporto solido in sospensione;
- Granulometria: determina la dimensione dei sedimenti presenti in alveo, è un fattore molto importante soprattutto nel momento in cui si pianificano interventi di consolidamento.

Configurazione del corso d'acqua:

- Profilo longitudinale: fornisce informazioni sulle variazioni dell'elevazione del fiume, inoltre viene utilizzato per suddividere i fiumi in categorie collegate alla pendenza, le quali riflettono la tipologia morfologica;
- Sezione trasversale: indica l'incisione alla quale è soggetto un alveo;
- Planimetria: mostra le tipologie di forme che assume un corso d'acqua che scorre all'interno del bacino.

1.2 La composizione del sistema fluviale

Per comprendere quello che è il sistema fluviale e la sua composizione, è necessario partire da un inquadramento generale a livello di bacino idrografico.

Un bacino idrografico può essere suddiviso in tre zone, come descritto da Schumm (1977):

- Zona di erosione (*Zone of erosion*);
- Zona di trasporto (*Zone of transport*);
- Zona di deposizione (*Zone of deposition*).

Questa suddivisione è stata poi rappresentata (Figura 1.3) da Kondolf (1994):

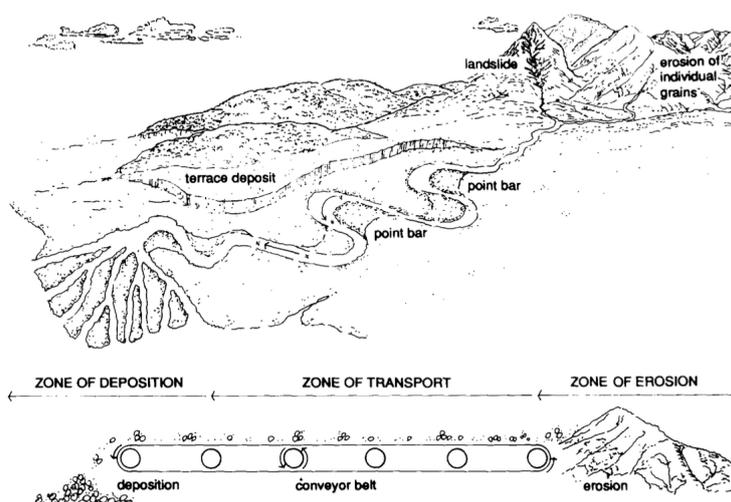


Figura 1.3: Rappresentazione del comportamento del bacino

In questa rappresentazione (Figura 1.3), la zona di trasporto viene raffigurata come un nastro trasportatore, esso prende in carico il sedimento e lo sposta fino alla zona di deposizione. In questa zona, è possibile che parte del sedimento venga trattenuto da eventuali ostruzioni (naturali e/o antropiche) o che se ne aggiunga una parte derivante dal letto del fiume e dai siti di stoccaggio come barre fluviali, terrazzi e pianie alluvionali. All'interno del sistema fluviale si possono trovare a seconda della scala spaziale diverse unità, le quali sono ordinate secondo una gerarchia decrescente. Questo ordinamento è possibile osservarlo nella Figura 1.4.

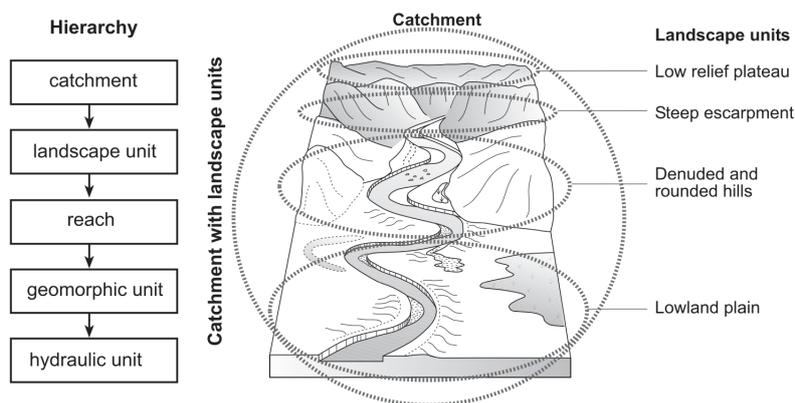


Figura 1.4: Ordinamento gerarchico delle unità (Fryirs et al., 2012)

Aumentando la scala di osservazione, è possibile individuare numerose caratteristiche o forme che vanno a comporre ciascuna unità. Nell'immagine seguente (Figura 1.5), viene mostrato un tipico ambiente fluviale con le forme ad esso connesse da monte a valle.

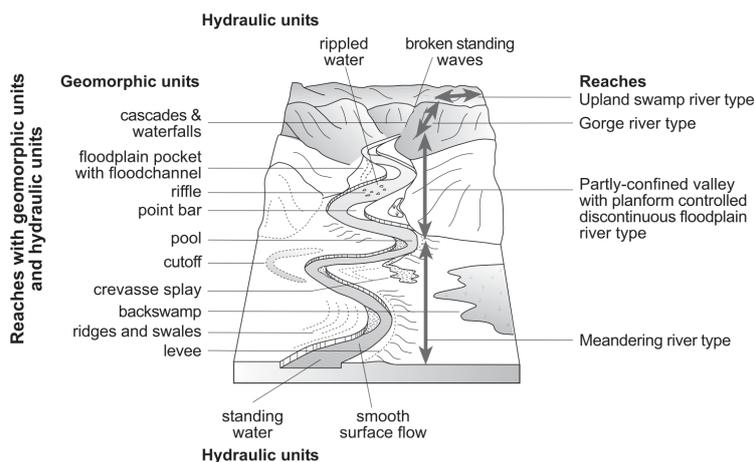


Figura 1.5: Suddivisione del bacino in tratti ed individuazione delle unità idrauliche e geomorfologiche (Fryirs et al., 2012)

È possibile, poi, eseguire una suddivisione degli elementi del tracciato fluviale in base alla loro origine, che può essere di tre tipi: erosiva, deposizionale o mista.

Origine erosiva:

Canali di deflusso: all'interno di un alveo ci possono essere diverse tipologie di canali di deflusso, questo perché transitano diverse portate, ognuna di essa con una magnitudo differente. Il passaggio di portate diverse crea quindi multiple sezioni nell'alveo. Si possono identificare tre tipologie di canali, ovvero: canale di magra,

di morbida e di piena. La granulometria gioca un ruolo fondamentale, dato che influenza direttamente la capacità o meno del fondo e delle sponde di erodersi e di conseguenza di assumere caratteristiche diverse. Si definisce poi il punto più profondo come *thalweg*.

Pozze: questo elemento deriva dall'azione erosiva localizzata causata da una corrente, che possiede un eccesso di energia. Rivestono particolare importanza nel tracciato fluviale, in quanto sono punti che dissipano energia della corrente, grazie ai moti secondari che si instaurano al loro interno. Solitamente è possibile trovarle in combinazione con altre forme, dando luogo a *step-pool* e *riffle-pool*.

Origine deposizionale:

Barre: sono corpi sedimentari che si formano all'interno dell'alveo, solitamente sono privi di vegetazione perenne, in quanto spesso sommerse; si trovano invece in completa emersione durante i deflussi di magra. Questi accumuli di sedimento si formano a causa della diminuzione delle condizioni idrometriche, caratterizzate da una minore energia. Tendenzialmente sono corpi che tendono a migrare verso valle durante eventi di piena, sono invece fisse le barre di meandro o le barre che sono causate da fattori esterni, come ostruzioni.

All'interno dell'alveo è possibile che si formino numerose tipologie di barre (Figura 1.6):

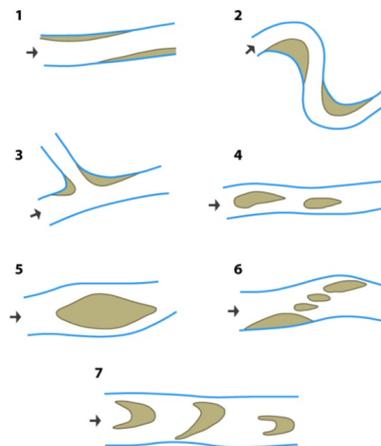


Figura 1.6: Principali tipologie di barre: 1) laterali; 2) di meandro; 3) di confluenza; 4) longitudinali; 5) a losanga; 6) diagonali; 7) dune di sabbia (Kellerhals et al., 1976)

Piana inondabile: è possibile definire la piana inondabile come una superficie di origine deposizionale, pianeggiante, e adiacente all'alveo formata dal corso d'acqua nelle presenti condizioni di regime. Viene definita anche come *active* o *modern floodplain* in letteratura anglosassone (Surian et al., 2009). La piana inondabile, viene sommersa periodicamente ogni 1-3 anni, dalla portata a piene rive.

Terrazzo: la maggior parte di essi rappresentano piane alluvionali abbandonate e si possono trovare a diversi livelli rispetto alla piana. Dato il livello topografico più alto, i terrazzi sono soggetti ad inondazioni con una frequenza superiore a 3 anni. I terrazzi bassi possono essere sommersi leggermente meno delle pianure alluvionali, mentre non possono essere quasi mai sommersi i terrazzi alti (Hupp et al., 1996).

Raschi: costituiscono punti con un'altezza topografica maggiore nel profilo longitudinale dell'alveo e possono inoltre essere considerati delle macro-forme di fondo. Il sedimento dal quale sono formati, è tendenzialmente grossolano, il sedimento fine è invece quasi assente. Si trovano in molteplici tipologie di corsi d'acqua, soprattutto in quelli ghiaiosi. Se si trovano su pendenze elevate, ovvero maggiori del 3-5%, possono dare origine a gradini (Lenzi, 2023).

Salti: queste tipologie di forme si possono trovare specialmente in corsi d'acqua montani, in quanto sono fortemente influenzati dalla granulometria grossolana, affioramenti del substrato roccioso e materiale legnoso di grosse dimensioni. È possibile dividere i salti in *rock steps* e *log steps*, i primi si formano per gli affioramenti rocciosi, i secondi per ostruzioni create dal legname in alveo. Le cascate possono essere viste come dei *rock step* di grandi dimensioni (Lenzi, 2023).

Origine mista:

Meandri: i meandri, si possono definire anse con andamento sinuoso, che caratterizzano i fiumi con pendenze molto basse e formati da sedimento fine, facilmente erodibile e trasportabile. I meandri vanno in contro ad uno spostamento laterale e longitudinale attraverso un processo di erosione sulla parte concava, viceversa, si ve-

rifica deposizione sulla parte convessa. (Seminara, 2006). Tale dinamica è possibile osservarla nelle seguente figura (Figura 1.7):

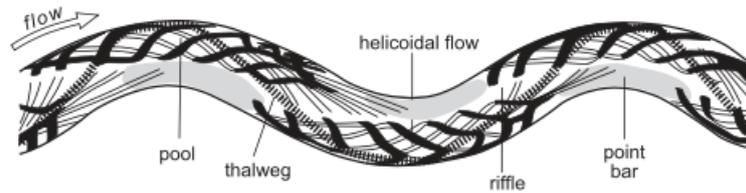


Figura 1.7: Dinamica dei flussi in presenza di meandri (Fryirs et al., 2012)

Forme di fondo: il fondo di un corso d'acqua, non è mai piano, al contrario, specialmente in corsi formati da granulometrie molto fini, come ad esempio la sabbia, si trova una forte presenza di forme di fondo. Derivano dalla modellazione da parte della corrente, dove ogni velocità crea una forma diversa; per una velocità crescente della corrente si ha la formazione di: ripples (o increspature), dune con ripples sovrainposti, dune, fondo piano, antidune ed antidune con frangimento d'onda (Lenzi, 2023).

1.3 La classificazione dei sistemi fluviali

Dopo aver introdotto i necessari parametri di riferimento per descrivere le caratteristiche di un corso d'acqua, è possibile procedere con la vera e propria classificazione morfologica fluviale. Prima di tutto, è necessario effettuare una suddivisione dei corsi d'acqua in due macrogruppi; ovvero: tratti colluviali, i quali si trovano nei segmenti di testata del bacino, e tratti alluvionali, o anche detti a fondo mobile, nei quali il corso d'acqua va a modificare i sedimenti da lui stesso trasportati e depositati. È proprio su questi tratti che la morfologia fluviale concentra lo studio per svolgere una classificazione. Da molto tempo, comprendere i processi che influenzano gli schemi ed i caratteri dei sistemi fluviali rappresenta l'obiettivo principale. Le differenze nei sistemi fluviali, così come le loro somiglianze in differenti contesti, rappresentano una reale sfida per lo studio. La complessità è data da una serie di variabili collegate che determinano la dimensione, lo schema ed il profilo del fiume attuale (Rosgen, 1994). Queste variabili che influenzano l'attuale condizione dei sistemi fluviali sono di otto tipologie, in particolare si individuano: la larghezza e la profondità del canale, la velocità, la portata, la pendenza, la rugosità ed il carico dei sedimenti e la loro dimensione (Leopold et al., 1964). Quando si descrive un sistema fluviale ed il susseguirsi di forme diverse, è importante sapere che non esistono confini distinti tra una forma ed un'altra, ma si ha una graduale modifica dettata dalle diverse variabili riportate da Leopold et al. (1964). Quindi si riconosce quello che è il continuum fluviale. In particolare si nota il concetto di continuità nella classificazione proposta da Schumm (1977), di cui si riporta la rappresentazione (Figura 1.8).

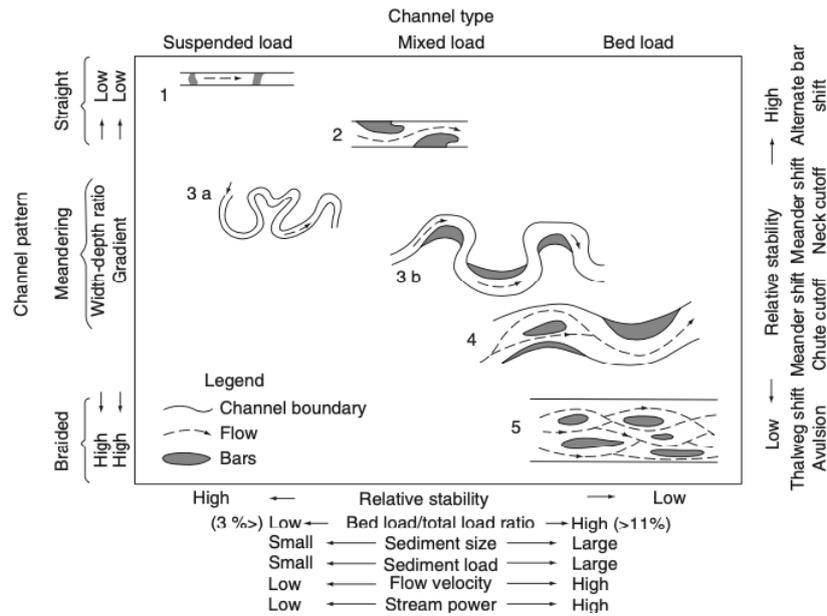


Figura 1.8: Classificazione dei corsi d'acqua alluvionali (Schumm, 1977)

Inizialmente, le forme considerate, come si può vedere dalla Figura 1.8, erano tre, canali intrecciati, meandriforme ed infine, rettilinei. Successivamente venne introdotta una quarta forma, che inizialmente veniva considerata una forma a canali intrecciati molto intensa (Leopold et al., 1957). Nonostante l'evidente continuum delle forme fluviali, quando si effettua un esame più approfondito delle forme geomorfologiche e delle caratteristiche dei canali alluvionali, é comunque conveniente considerare i canali separatamente. (Thorne et al., 1997). Negli anni quindi si sono viste, un susseguirsi di classificazioni morfologiche, ognuna riferita a particolari aspetti e variabili. Le classificazioni più recenti e complete sono quella di Rosgen (1994), Montgomery & Buffington (1997) ed infine la classificazione di Billi (1994). Di seguito, considerato lo scopo della presente tesi, verrà descritta solamente la classificazione di Billi (1994).

1.3.1 La classificazione di Billi (1994)

Billi nel 1994 realizzò una classificazione dei corsi d'acqua basandosi sui loro parametri geometrici. Individua cinque tipologie di configurazioni d'alveo, che sono: rettilineo, intrecciato, pseudomeandriforme, meandriforme ed infine anastomizzato (Figura 1.9).

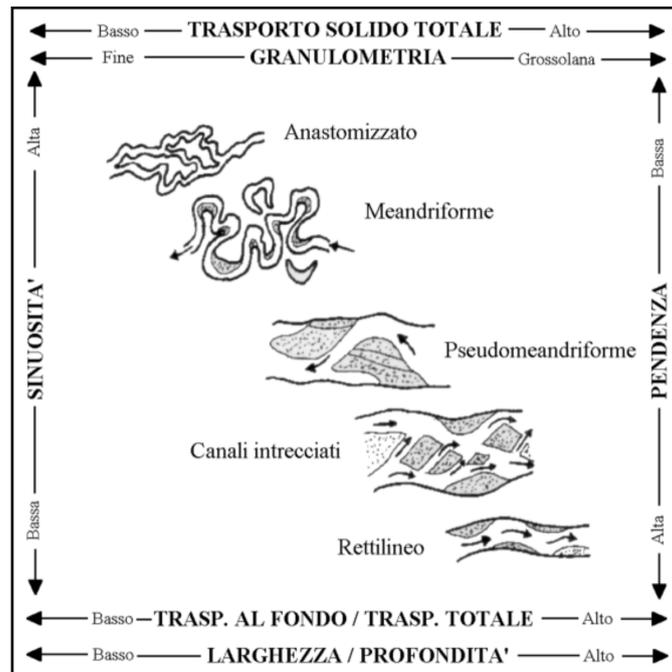


Figura 1.9: Schema delle configurazioni d'alveo (modificato da Billi et al. (1994)) estratto da Lenzi et al. (2000)

Corso d'acqua rettilineo

I canali rettilinei (Figura 1.10) sono una conformazione piuttosto rara, solitamente non si trovano canali rettilinei più lunghi di dieci volta la larghezza dello stesso. Nonostante le sponde si presentino rettilinee, il filone principale della corrente segue sempre un andamento sinuoso spostandosi da una sponda all'altra; questa dinamica è legata alla presenza di barre alternate che deviano il flusso. Queste tipologie si formano soprattutto in zone montane dove le pendenze sono piuttosto elevate ($> 0.5-1\%$), l'alimentazione di sedimenti è forte e talvolta formata da clasti anche grossolani. È comune trovare affioramenti rocciosi; se quest'ultimi predominano, l'alveo viene definito a "fondo fisso" e questo indica una capacità di trasporto maggiore dell'alimentazione derivante da monte. Il sedimento presente contribuisce alla formazione

di barre laterali alternate, rappresentano accumuli piuttosto mobili, soprattutto durante gli eventi di piena. Il sedimento decresce dalla testa della barra verso la coda, a causa del minor tirante idrico in grado di sommergerle.



Figura 1.10: Corso d'acqua rettilineo (Lenzi, 2023)

Corsi d'acqua a canali intrecciati

Queste tipologie di corsi d'acqua (Figura 1.11) sono molto comuni e si formano in diversi ambienti, con pendenze comprese tra lo 0.01 e 0.1%. In ambienti periglaciali, quindi caratterizzati da un clima temperato umido o freddo, si formano su ampie pianure alluvionali ghiaiose; mentre negli ambienti semi-aridi si formano corsi d'acqua a canali intrecciati su fondo sabbioso. Queste configurazioni presentano alvei molto ampi costituiti da due o più canali che si intersecano, separati da barre o da isole a forma di losanga. Possiedono un rapporto larghezza/profondità superiore a 40 e può arrivare fino a 300. È possibile trovare due tipologie di barre: barre alte e barre basse. Le prime, vengono sommerse solo durante eventi di piena di maggior entità, sono caratterizzate dalla presenza di sedimento fine nella parte superficiale che favorisce l'insediamento e la crescita della vegetazione arborea, permettendo così una forte stabilizzazione dell'accumulo, in questo caso viene definita "isola". La seconda tipologia di barra, è caratterizzata da un livello topografico inferiore e di conseguenza può venire sommersa da piene ordinarie. Queste configurazioni fluviali sono dotate di una forte dinamicità, con spostamento delle barre e dei canali durante eventi di piena.



Figura 1.11: Corso d'acqua a canali intrecciati (Lenzi, 2023)

Corsi d'acqua pseudomeandriformi

I corsi d'acqua pseudomeandriformi (Figura 1.12) rappresentano una categoria intermedia tra corsi d'acqua intrecciati e meandriformi, e presentano una sinuosità medio-bassa (1.3 - 1.5) che può variare a seconda del livello della portata. Per portate di magra e morbida le barre sono emerse ed il flusso si presenta meandriforme (sinuosità pari a 1.5), per portate di piena le barre vengono sommerse e la sinuosità tende all'unità, essendo le sponde generalmente rettilinee, quasi parallele. È spesso presente un canale secondario, generalmente aderente ad una delle due sponde, di larghezza variabile ma comunque non superiore alla larghezza del canale principale. I canali secondari si possono dividere in canali attivi (di taglio) o inattivi (di morta). I primi si formano durante piene di una certa entità per taglio longitudinale di una barra laterale, i canali di morta invece rappresentano la parte terminale di un canale inattivo e viene alimentato solo durante le piene, in assenza di esse si trova acqua stagnante.



Figura 1.12: Corso d'acqua pseudomeandriforme (Lenzi, 2023)

Corsi d'acqua meandriformi

Il tracciato planimetrico di questa configurazione, presenta un susseguirsi di anse più o meno regolari, dette meandri (Figura 1.13). Sono provvisti di una sinuosità alta, da 1.5 fino a 3 che non varia con la portata. La granulometria che li compone è generalmente limo-argillosa oppure sabbiosa, dato che si trovano in pendenze minori del 0.1 %; è possibile comunque che si trovino corsi d'acqua meandriformi su fondo ghiaioso, soprattutto nelle valli a bassa e media pendenza. Oltre ai meandri, si trova un alternarsi di raschi in corrispondenza del punto di inflessione tra i meandri e le pozze, presenti nell'apice della curva.



Figura 1.13: Corso d'acqua meandriforme (Lenzi, 2023)

I corsi d'acqua meandrici, oltre che ai normali parametri che vengono utilizzati nelle altre configurazioni, sono descritti da alcuni parametri caratteristici come ampiezza A , lunghezza L e raggio di curvatura R . (Figura 1.14).

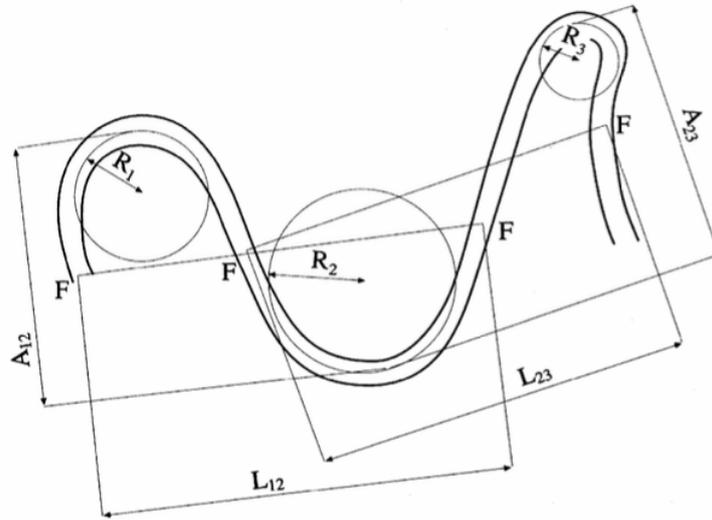


Figura 1.14: Parametri A , L e R dei corsi d'acqua meandrici (Lenzi, 2023)

Sono soggetti poi a migrazione, in relazione all'erosione della sponda esterna e sedimentazione di quella interna e questo causa una variazione sia trasversale che longitudinale. Tale migrazione porta ad un aumento della sinuosità e può determinare il taglio di collo del meandro. Se la sinuosità è minore e il fondo è tendenzialmente formato da sedimenti più grossolani, può verificarsi invece il taglio di barra di meandro. Infine, sono frequenti i fenomeni di avulsione, ovvero il completo abbandono del tracciato originario con la creazione di un nuovo percorso in seguito all'erosione dovuta da una piena.

Corsi d'acqua anastomizzati

I corsi d'acqua anastomizzati (Figura 1.15), sono configurazioni piuttosto stabili, il cui alveo è formato da due o più canali che singolarmente presentano una sinuosità variabile, ma in genere sono considerati canali meandrici interconnessi tra loro. Si trovano su pendenze molto basse ($<0.01\%$); le zone che dividono i canali non sono considerate barre o isole, ma sono porzioni di piana alluvionale con dimensioni molto maggiori rispetto alla larghezza del canale. La dinamica dei corsi d'acqua anastomizzati è piuttosto lenta, a causa dell'elevata coesione delle sponde e ciò

comporta una forte stabilità. Sono configurazioni piuttosto rare, si trovano in zone in cui si verifica un accrescersi dei processi deposizionali in seguito a rapida subsidenza e repentino cambiamento del livello medio di base.



Figura 1.15: Corso d'acqua anastomizzato (Lenzi, 2023)

1.4 L'impiego della tecnologia LiDAR

La tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) costituisce uno dei mezzi più efficaci e affidabili per la raccolta dei dati del terreno (Liu, 2008). Quest'ultima rientra nelle tecniche di *remote sensing*, ovvero, l'acquisizione di informazioni riguardanti un oggetto, senza entrare in contatto con esso. Il funzionamento si basa sulla misurazione dell'energia elettromagnetica che viene emessa verso l'oggetto e riflessa dallo stesso (Gautam et al., 2015). I sistemi LiDAR, si servono di un laser scanner che si può trovare posizionato a terra, a bordo di satelliti o mezzi aerei. Il laser rilascia impulsi di luce che viaggiano da quest'ultimo fino alla superficie interessata e misura il tempo tra l'emissione e il ritorno dell'impulso e ne calcola la distanza percorsa. Tipicamente un sistema LiDAR aereo è formato da tre parti principali: un'unità laser scanner, un ricevitore GPS (*Global Position System*), che si occupa di individuare la posizione rispetto ad un punto di riferimento ed un'unità di misura inerziale detta IMU (*Inertial Measurement Unit*) che permette di controllare i tre gradi di libertà che vanno ad influenzare l'assetto di volo, ovvero: beccheggio, rollio e deriva del mezzo. Nella figura seguente (Figura 1.16), è possibile osservare la composizione di un tipico sistema di laser scanning aereo.

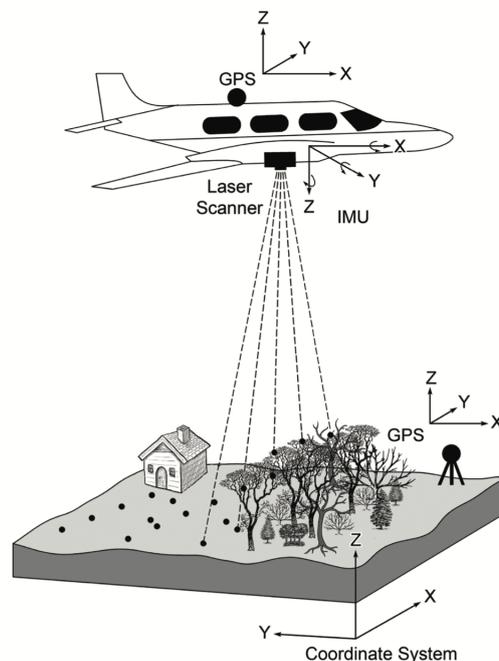


Figura 1.16: Tipico sistema di laser scanning aereo (Roman et al., 2016)

Con l'impiego di questa tecnologia, risulta semplificata e velocizzata la fase di raccolta dati garantendo comunque un'elevata precisione ed affidabilità di quanto ricavato.

Tramite questa procedura si ottengono nuvole di punti della superficie dalle quali è possibile generare modelli digitali di elevazione (DEM) e, più in dettaglio, modelli digitali della superficie del terreno (DSM) e modelli digitali del terreno (DTM). I DEM rappresentano una digitalizzazione di una qualsiasi superficie, in cui ad ogni punto spaziale individuato mediante una coordinata x e y , corrisponde un dato sull'elevazione (coordinata z). I DEM si classificano in tre tipologie principali, osservabili anche in Figura 1.17:

- a) *Regular grid structures*;
- b) *Triangulated irregular networks (TIN)*;
- c) *Contour structures*.

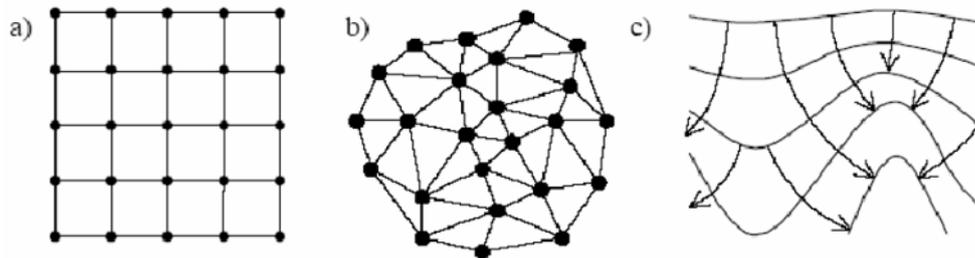


Figura 1.17: Classificazione dei DEM: a) Regular grid, b) TIN, c) Contour structures (Masini et al., 2011)

Il DEM, quindi, rappresenta digitalmente una generica superficie. Si distingue poi, il DSM (*Digital Surface Model*) che include gli elementi presenti al di sopra della superficie, come edifici o vegetazione; una seconda tipologia è il DTM (*Digital Terrain Model*) il quale rappresenta la terra “nuda” priva degli elementi che si trovano sopra di essa. I DTM non sono altro che una versione più definita e raffinata dei DEM, nei quali viene utilizzata un'elaborazione aggiuntiva per rappresentare più accuratamente le caratteristiche distintive del terreno; entrambi rappresentano il prodotto base per svolgere analisi topografiche (Croneborg et al., 2020). Nella figura seguente (Figura 1.18) è possibile notare la differenza tra i due modelli precedentemente introdotti.

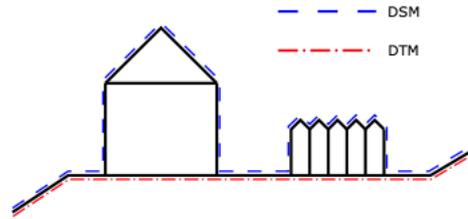


Figura 1.18: Differenza tra DSM e DTM (Meza et al., 2019)

1.4.1 Il monitoraggio indiretto delle forme fluviali

Analizzare le dinamiche fluviali, richiede un'acquisizione ed un confronto di dati riguardanti diversi periodi di tempo, diventa perciò necessario processare tali acquisizioni in modo da evidenziare i cambiamenti morfologici all'interno di una data area. Un metodo di *remote sensing* potenzialmente valido per lo studio delle dinamiche geomorfologiche è il DoD (*Dem of Difference*), che permette di quantificare la variazione volumetrica tra rilievi topografici successivi (Azzoni et al., 2023). Questo metodo, esegue una sovrapposizione di due modelli digitali del terreno riferiti a due epoche diverse e restituisce un ulteriore modello digitale dato dalla differenza dei due, con quanto ottenuto è possibile osservare le modifiche che sono avvenute nell'arco temporale considerato. Questa metodologia fornisce inoltre informazioni sull'interazione tra processo e forma ottenuta e può anche essere utilizzata per valutare le previsioni dei modelli di morfodinamica (Williams, 2012).

Per l'elaborazione del DoD, la letteratura scientifica spesso si avvale del tool *Geomorphic Change Detection* (GCD) (Wheaton et al., 2010; Wheaton et al., 2013). Questo tool, disponibile sia come applicazione autonoma che come plugin per *ArcMap*, offre la possibilità di stimare volumi, aree e differenze di quote, oltre che di definire le incertezze a seconda delle tipologie di superficie o del rilievo effettuato per la produzione del DTM. La figura seguente (Figura 1.19), rappresenta in modo semplificato il funzionamento della tecnica dei DoD:

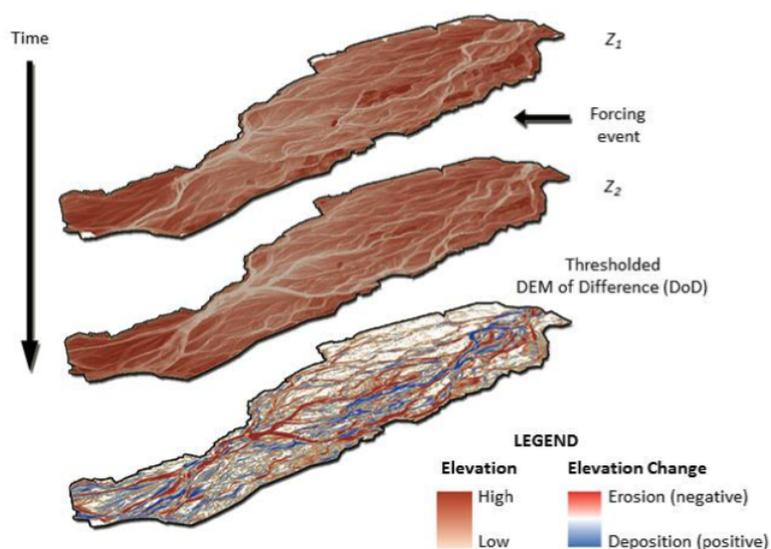


Figura 1.19: Schematizzazione del funzionamento dei DoD (Williams, 2012)

Per l'elaborazione del DoD, la letteratura scientifica spesso si avvale del tool *Geomorphic Change Detection* (GCD) (Wheaton et al., 2010; Wheaton et al., 2013). Questo tool, disponibile sia come applicazione autonoma che come plugin per *Arc-Map*, offre la possibilità di stimare volumi, aree e differenze di quote, oltre che di definire le incertezze a seconda delle tipologie di superficie o del rilievo effettuato per la produzione del DTM.

Obiettivi

La presente tesi ha come obiettivo principale quello di analizzare le variazioni morfologiche nel medio periodo del Fiume Piave, all'interno di tre sottotratti, più precisamente localizzati a ridosso della località di Nogarè, in Provincia di Belluno.

Al fine di raggiungere tale obiettivo, sono state utilizzate due specifiche metodologie. La prima verte nell'individuazione delle unità morfologiche presenti, mediante un'analisi foto interpretativa multitemporale, svolta per il 2011, 2015 e 2023 grazie all'impiego del software *ArcGis Pro*. L'analisi viene eseguita in relazione a due eventi intensi superiori al livello della portata a piene rive (*bankfull*), avvenuti nel 2014 e nel 2018, e che hanno avuto forte impatto sulla morfologia fluviale. La seconda tipologia di analisi si concentra sulla quantificazione volumetrica, verticale e spaziale di tali variazioni, mediante l'applicativo GCD (*Geomorphic Change Detection*). Quest'ultimo permette di computare i DoD (*Dem of Difference*), relativi alle sezioni interessate, evidenziando le variazioni complessive tra il 2011 e 2023.

Materiali e metodi

3.1 Area di studio

Il Fiume Piave sorge nel versante meridionale del Monte Peralba ad un'altitudine di 2037 m s.l.m.. Si articola all'interno del territorio per una lunghezza complessiva di 222 km, fino a concludere il proprio percorso nel mare Adriatico in corrispondenza del porto di Cortellazzo; il bacino idrografico ha un'estensione pari a 3899 km² (Figura 3.1).



Figura 3.1: Bacino idrografico del Fiume Piave – da Piano di gestione dei bacini idrografici delle Alpi Orientali

Il corso principale del fiume Piave si divide in tre parti: dalla sorgente fino a Longarone (BL) è caratterizzato da una morfologia fortemente incisa e stretta, nel tratto intermedio fino a Ponte di Piave (TV) si trova invece una configurazione pluricursale. Prosegue poi, con l'ultimo tratto fino alla foce, con una configurazione meandriforme e vede la presenza di segmenti rettilinei artificiali (Surian, 1999; Picco et al., 2023). Il Fiume Piave nel corso degli anni ha subito grandi influenze che hanno causato una variazione della sua morfologia, in particolare a partire dal 1930, si sono susseguiti numerosi interventi per il controllo dell'erosione e si è vista la creazione di molteplici dighe per la produzione di energia idroelettrica. Tutto questo, susseguito da un intenso periodo di attività minerarie tra il 1960 e il 1990, ha contribuito ad un restringimento del canale associato ad un'incisione del letto fluviale (Comiti et al., 2011). La presente tesi focalizza lo studio sulle variazioni morfologiche, in tre sottotratti (A1, A2, A3) del Fiume Piave individuabili in Figura 3.2.

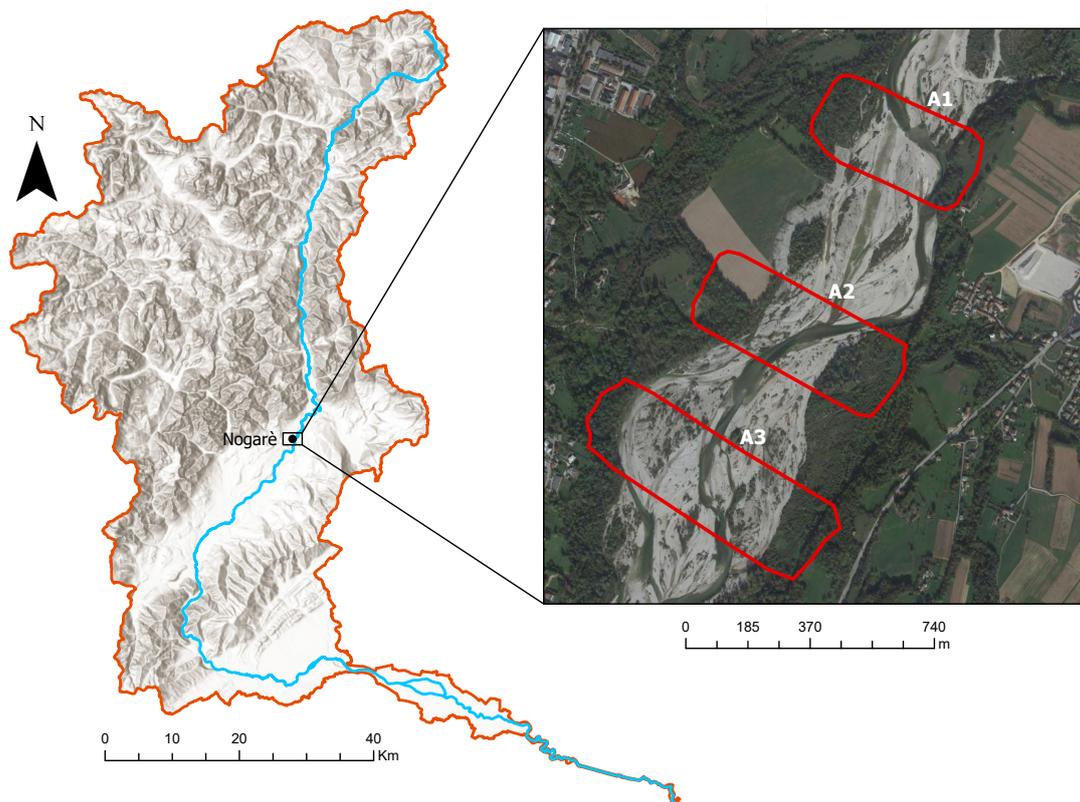


Figura 3.2: Inquadramento da ortofoto dei sottotratti oggetto di studio

I sottotratti oggetto di studio coprono una superficie complessiva di 476.604 m^2 ; in corrispondenza di quest'ultimi la configurazione morfologica è a canali intrecciati (Picco et al., 2016) caratterizzati da una pendenza media dello 0.33% (Rainato et al.,

2014), con un sedimento prevalentemente ghiaioso, ed una distribuzione dei diametri caratteristici pari a $D_{16} = 11.46$ mm, $D_{50} = 31.37$ mm e $D_{84} = 70.73$ mm.

3.2 Caratterizzazione idrologica

Le condizioni idrologiche che hanno caratterizzato il periodo oggetto di studio (2011-2023), vengono descritte mediante i dati di portata massima registrati grazie alla stazione di monitoraggio dell'ARPAV (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto) denominata Belluno-Aeroporto e situata ad un'altitudine di 379 m s.l.m.. Come si nota dall'idrogramma elaborato mediante i dati ARPAV (Figura 3.3), si riscontrano due eventi particolarmente intensi, il primo nel novembre 2014 e il secondo nell'ottobre 2018 corrispondente alla tempesta Vaia, le portate registrate sono state di $819 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1159 \text{ m}^3/\text{s}$ rispettivamente. Lo studio condotto da Comiti et al. (2011), ha permesso di stimare la portata a piene rive (*bankfull*) pari a $700 \text{ m}^3/\text{s}$, parametro superato ampiamente dai due eventi di piena citati sopra, contribuendo in particolar modo ad influenzare l'assetto fluvio-morfologico del corso d'acqua.

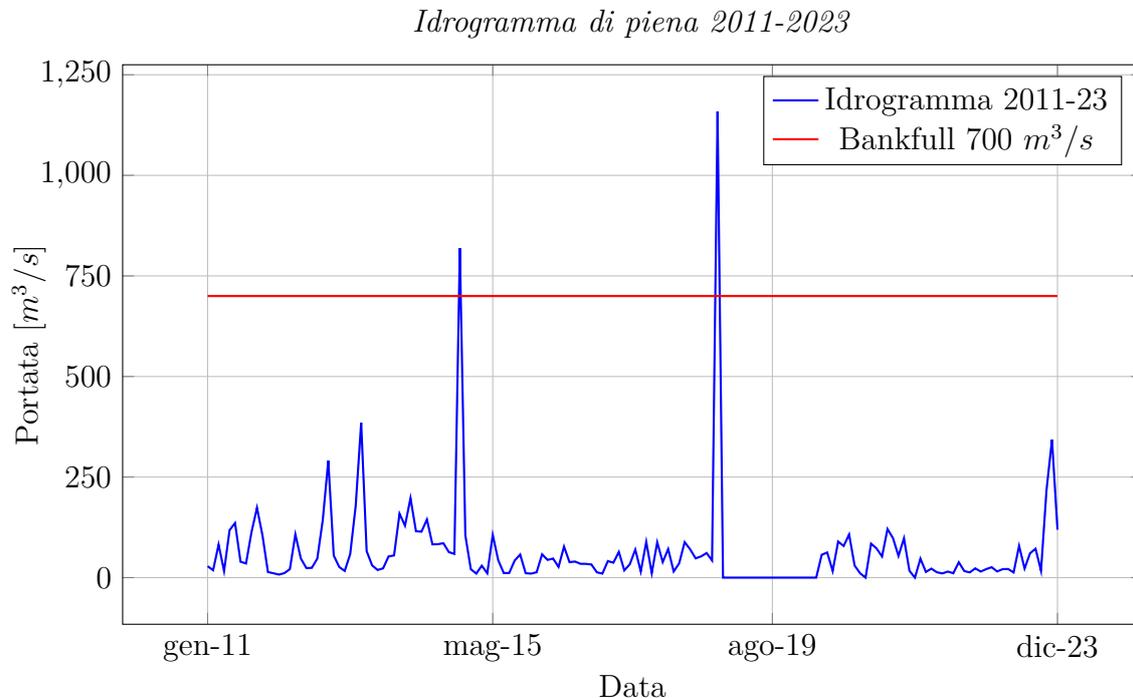


Figura 3.3: Idrogramma rappresentate i valori massimi mensili di portata liquida (m^3/s) registrati nel periodo intercorso tra 2011-2023

3.3 Analisi fotointerpretativa multitemporale da ortofoto

Mediante l'analisi multitemporale da ortofoto si sono analizzate nel dettaglio le variazioni che hanno subito le unità morfologiche in tre periodi differenti, ovvero: 2011; 2015 a seguito dell'evento del novembre 2014; ed infine 2023 a seguito dell'evento Vaia. In particolare, si andranno ad analizzare le variazioni:

- Delle barre, sia barre nude che vegetate;
- Delle isole;
- Del canale bagnato;
- Della piana alluvionale.

3.3.1 Procedimento dell'analisi fotointerpretativa multitemporale

Per svolgere l'analisi multitemporale, si è fatto uso delle ortofoto relative ai tre periodi di interesse. Tramite il software *ArcGis Pro* è stato possibile effettuare una digitalizzazione, mediante la creazione di poligoni riferiti ad ogni unità morfologica presente; così da evidenziare le variazioni sia a livello grafico, che a livello areale, andando a calcolare l'estensione di ogni unità. È stato necessario prima di tutto, per svolgere l'analisi fotointerpretativa definire le modalità di individuazione di ogni singola unità morfologica. Come prima cosa si sono definite le isole presenti, caratterizzate da una fitta vegetazione e prevalentemente arborea, in questo modo è stato possibile escluderle dalle barre presenti. Quest'ultime sono state poi suddivise in barre nude qualora presentino ghiaia esposta e barre vegetate date dalla presenza di vegetazione bassa (arbustiva e/o erbacea) e scarsa al di sopra. Per quanto riguarda il canale bagnato, esso è stato individuato osservando il percorso tracciato, occupato da acqua. Infine è stata definita la piana alluvionale, comprendendo la porzione di terreno al di fuori del canale attivo.

3.4 Analisi mediante DoD

La seconda tipologia di analisi, svolta ai fini della presente tesi, è stata realizzata utilizzando come introdotto precedentemente l'applicativo *Geomorphic Change Detection (GCD)*; il quale permette di ottenere un'analisi volumetrica e spaziale delle variazioni avvenute nell'arco temporale 2011-2023.

3.4.1 Estrazione dei DoD mediante GCD e gestione dell'errore

L'estrazione del DoD, come spiegato da Williams (2012), è basata su una semplice sottrazione di modelli digitali riferiti a due epoche diverse, secondo la seguente formula:

$$\delta E = Z_2 - Z_1 \quad (3.1)$$

Dove Z_2 è riferito al DEM più datato mentre Z_1 è il DEM più recente e δE è la quantificazione volumetrica risultante. Secondo Wheaton et al. (2010), ogni superficie Z_{DEM} è caratterizzata dalla presenza di un errore verticale δz , per cui:

$$Z_{\text{actual}} = Z_{\text{DEM}} \pm \delta z \quad (3.2)$$

Dove Z_{actual} corrisponde alla vera e propria elevazione della superficie senza errori. Diventa quindi necessario quantificare tale errore al fine di ottenere risultati il più possibile vicini alla realtà. Per quantificare l'errore possono venire utilizzati due metodi, il primo chiamato *Minimum Level of Detection*, il secondo prevede di stabilire una soglia probabilistica utilizzando un intervallo di confidenza definito dall'utente, detto *probabilistic thresholding*. Entrambi questi procedimenti verranno di seguito descritti:

Minimum Level of Detection (LOD_{min})

Tale metodo permette di definire un valore minimo di variazione da considerare, costante per tutta la superficie del DEM. In questo modo vengono valutate solo le

modifiche che comportano una variazione maggiore del valore impostato, così facendo si va ad eliminare la possibile influenza di fattori di tipo non geomorfologico, come ad esempio la crescita della vegetazione. Viene determinato tramite RSS (*Root Sum Square*), secondo la seguente formula:

$$\delta U_{\text{DOD}} = \sqrt{\delta z_1^2 + \delta z_2^2} \quad (3.3)$$

Dove, δz_1 e δz_2 corrispondono all'errore associato a Z_1 e Z_2 .

Probabilistic thresholding

A differenza del primo metodo, il presente, consente un approccio più rigoroso. Viene utilizzata una soglia di tipo probabilistico, calcolata sulla base della deviazione standard dell'errore per Z_1 e Z_2 . Secondo questa metodologia la formula precedente, diventa:

$$U_{\text{crit}} = t\sqrt{SDE_1^2 + SDE_2^2} \quad (3.4)$$

Dove, U_{crit} rappresenta l'errore calcolato, SDE_1 e SDE_2 la deviazione standard dell'errore (*Standard Deviation Error*) per le superfici DEM Z_1 e Z_2 utilizzate. Infine t rappresenta il valore di *t Student* di un intervallo di confidenza, calcolato secondo la seguente formula:

$$t = \frac{|z_1 - z_2|}{\delta u} \quad (3.5)$$

Dove $|z_1 - z_2|$ è il valore assoluto del DoD. Grazie al calcolo di una soglia probabilistica è quindi possibile rimuovere le problematiche riferite al filtraggio delle variazioni di elevazione in base alla fiducia che il cambiamento rilevato sia reale.

Visti entrambi i metodi, e visto l'errore verticale associato alla creazione del DEM utilizzato nel presente elaborato, pari a circa 20 cm, è stato scelto un *minimum level of detection* costante pari all'errore correlato al modello digitale dell'elevazione.

3.4.2 Dati LiDAR

La creazione dei DEM si è basata su dati raccolti mediante rilievi da drone nei due periodi di interesse, le cui caratteristiche e aspetti tecnici sullo svolgimento verranno descritti di seguito. Il rilievo del 2011 è stato effettuato dall'azienda Bloom GCR S.p.A durante il periodo estivo, ad esso è associato un errore verticale di ± 0.2 m con una densità di punti pari a 1-2 punti/ m^2 ; dal quale è stato estratto un DTM con una risoluzione spaziale di 1mx1m. Per quanto riguarda il rilievo del 2023, è stato effettuato con drone Matrice 300 RTK con sensore LiDAR, sempre nel periodo estivo. Al contrario del rilievo del 2011 svolto su una superficie molto estesa, il rilievo del 2023 è stato eseguito in tre tratti ciascuno con una lunghezza di circa 250 m ed una larghezza variabile a seconda della larghezza del fiume, considerando come limite la piana alluvionale di destra e di sinistra idrografica. Per ogni tratto la densità di punti è di circa 812 punti/ m^2 e sono state scattate dalle 128 a 283 foto ad un'altezza di 70 m. Anche per questo rilievo la risoluzione è stata mantenuta di 1mx1m in modo da garantire la compatibilità con il rilievo del 2011. Infine, per garantire un'alta precisione della geolocalizzazione del rilievo del 2023, sono stati misurati dai 10 a 15 GCP (*Ground Control Point*) per tratto, mediante GPS differenziale RTK (*Real Time Kinematic*). Nell'immagine seguente (Figura 3.4) è possibile osservare il piano di volo programmato per realizzare il rilievo del sottotratto A2.

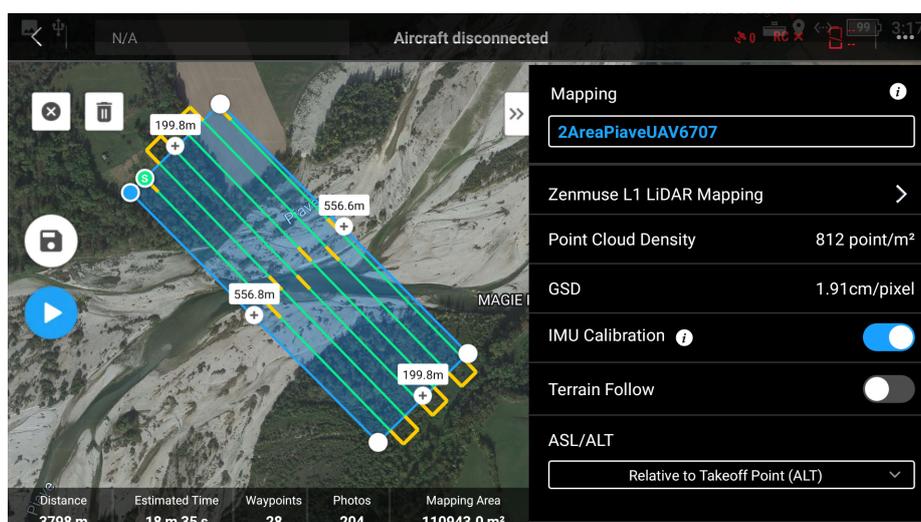


Figura 3.4: Piano di volo eseguito per il sottotratto A2

3.4.3 Parametri considerati nei DoD

L'elaborazione software dei DEM con il tool GCD, permette di ottenere molteplici risultati considerando diversi parametri, i quali verranno descritti nel presente capitolo. I risultati ottenuti vengono divisi in 4 categorie, ovvero: areali, volumetrici, cambiamenti medi verticali e percentuali (estratti dal volume).

Areali:

- Area totale erosa (m^2);
- Area totale depositata (m^2);
- Area totale con variazioni rilevabili (m^2): area soggetta sia ad erosione che deposizione con valori al di sopra del $minLOD$;
- Area totale di interesse (m^2): area totale sotto analisi (incluse variazioni rilevabili e non rilevabili);
- Percentuale dell'area di interesse con variazioni rilevabili: variazioni al di sopra del $minLOD$ all'interno dell'area di interesse.

Volumetrici:

- Volume totale eroso (m^3);
- Volume totale depositato (m^3);
- Volume totale (m^3): somma del volume eroso e depositato;
- Volume netto (m^3): volume netto rimanente (differenza tra deposizione ed erosione);

Cambiamenti medi verticali:

- Quota media erosa (m): corrisponde alla perdita verticale media della superficie (rapporto tra il volume totale eroso e l'area totale erosa);
- Quota media depositata (m): definisce il guadagno verticale medio della superficie (rapporto tra il volume totale depositato e l'area totale depositata);

- Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili: definisce la variazione altimetrica considerando solo i cambiamenti rilevabili (rapporto tra volume netto ed area totale con variazioni rilevabili).

Percentuali (estratti dal volume):

- Percentuale di erosione: percentuale del volume totale che corrisponde ad un abbassamento della superficie;
- Percentuale di deposito: percentuale del volume totale che corrisponde ad un innalzamento della superficie.

Risultati

4.1 Risultati ottenuti mediante analisi fotointerpretativa multitemporale

Nel seguente capitolo verranno riportati i dati relativi all'analisi fotointerpretativa multitemporale; i risultati mostrano in ordine cronologico (2011-2015-2023) le modifiche registrate suddivise per ogni sottotratto (A1-A2-A3).

4.1.1 Analisi fotointerpretativa nel sottotratto A1 per il 2011, 2015 e 2023

In corrispondenza del sottotratto A1 (Figura 4.1) si nota in destra idrografica la presenza, prevalente, della piana alluvionale. Spostandosi all'interno del canale attivo invece si trova una maggior superficie caratterizzata da ghiaie esposte, quindi classificabile come barra nuda, nella quale si trovano piccole porzioni occupate da barre vegetate e nella parte centrale un'isola. Per quanto riguarda il canale bagnato, lo si trova concentrato prevalentemente in un unico canale che attraversa in obliquo il sottotratto. Di minore entità si notano posizionati marginalmente i due canali secondari, il primo isolato in destra idrografica (canale di morta), ed il secondo in sinistra idrografica in parte ancora comunicante con il canale principale. Infine, la parte in sinistra idrografica è occupata principalmente da vegetazione, per cui, si nota una fascia di isole in prossimità del canale bagnato e la restante parte coper-

ta da vegetazione bassa, composta da specie erbacee ed arbustive classificata come barra vegetata.

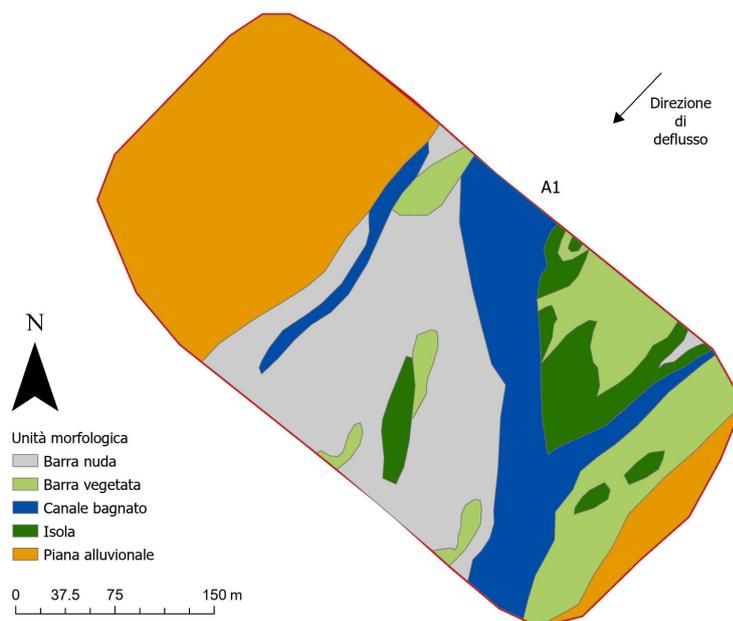


Figura 4.1: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2011

La Figura 4.2 evidenzia l'estensione delle diverse unità espresse in percentuale. Il 26% della copertura totale corrisponde alla barra nuda, che costituisce l'unità prevalente considerando quelle all'interno del canale attivo. Il 15% è occupato da barra vegetata, leggermente superiore con un 16.3% il canale bagnato, mentre l'unità meno estesa è l'isola con un 7.2%. Infine, all'esterno del canale attivo si trova la piana alluvionale con il 35.4%.

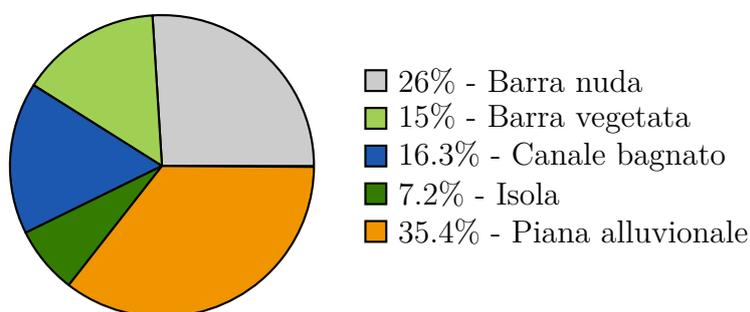


Figura 4.2: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2011

Nel 2015 (Figura 4.3) a seguito dell'evento sopra la *bankfull* (Figura 3.3), si nota una quasi completa eliminazione della superficie coperta da vegetazione, comportando in gran parte del canale attivo l'esposizione della ghiaia. Anche il canale

bagnato ha subito una forte variazione, si nota infatti un completo spostamento in sinistra idrografica, in corrispondenza dell'inizio della piana alluvionale. Nella parte centrale, invece, è rimasta una piccola porzione interessata dalla presenza di acqua; tuttavia, è quasi trascurabile data la sua ridotta estensione. Per quanto riguarda le piccole superfici ricoperte da vegetazione, si è notato un consolidamento delle porzioni restanti, visto il passaggio di alcune aree precedentemente classificate come barre vegetate ad isole.

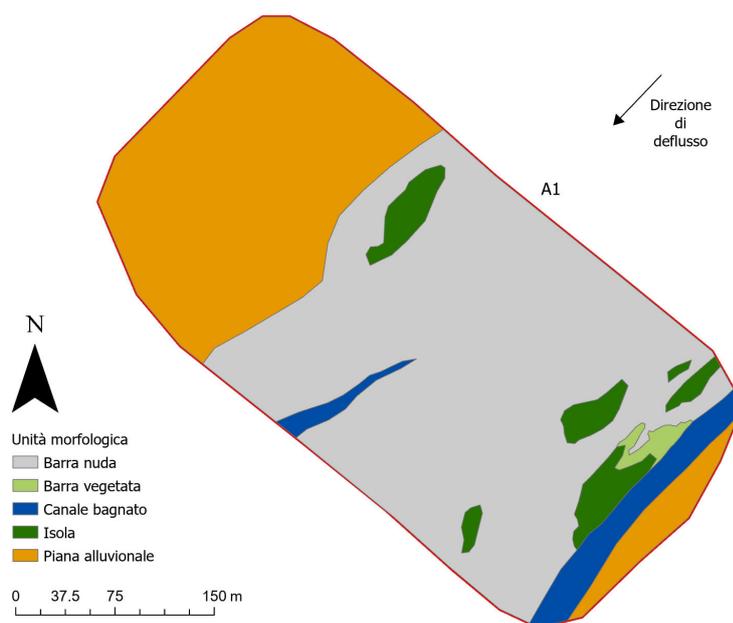


Figura 4.3: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2015

Quanto detto in precedenza lo si ritrova nel grafico sottostante (Figura 4.4). Nel 55.7% della superficie totale, il sottotratto A1 è coperto da barra nuda, mentre si riduce quella relativa a barra vegetata che interessa solo lo 0.8%. Il canale bagnato e l'isola, invece, coprono una superficie pari a 4.7% e 4.8%, rispettivamente. Per quanto riguarda la piana alluvionale non c'è una forte variazione rispetto all'analisi precedente (Figura 4.2), tuttavia si registra una leggera diminuzione a 34.1%.

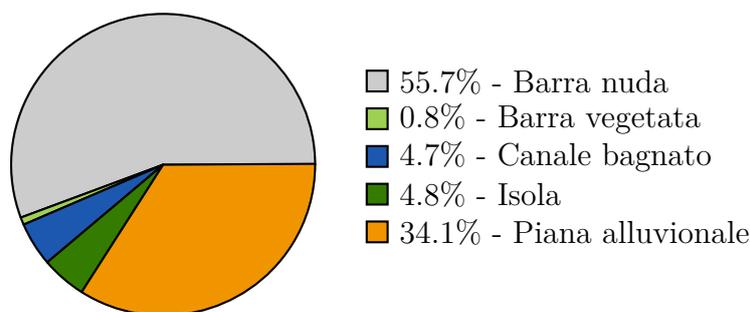


Figura 4.4: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2015

Nel 2023 (Figura 4.5) si osserva una condizione più complessa rispetto a quanto osservato negli anni precedenti. Si riscontra una significativa riduzione della superficie caratterizzata da barra nuda, mentre si nota un ritorno della vegetazione, per lo più giovane, vedendo così la formazione delle barre vegetate. Nella parte in destra idrografica, la vegetazione si consolida ulteriormente, favorendo così l'estensione dell'isola. Per quanto riguarda il canale bagnato, invece, si nota una ramificazione del percorso. Infine, si evidenzia anche una modifica della piana alluvionale, che si riduce in destra idrografica ed aumenta nella parte di sinistra idrografica. Di conseguenza, il canale attivo si sposta verso la destra idrografica rispetto agli anni precedenti.

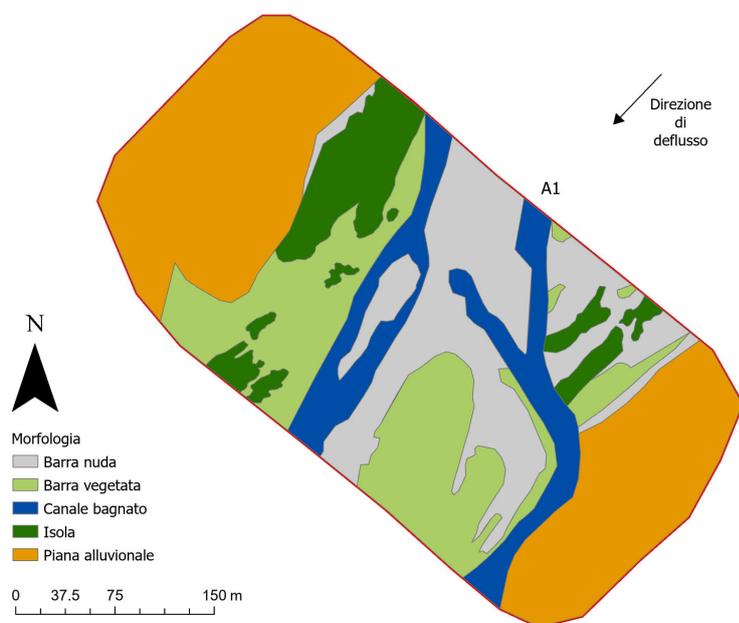


Figura 4.5: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A1 nel 2023

Le percentuali (Figura 4.6) mostrano una quasi equivalenza tra barra nuda e barra vegetata, coprendo rispettivamente il 21.4% ed il 21.6% della superficie totale. L'11.2% viene occupato dal canale bagnato ed il 9% viene classificato come isola. Infine, la piana alluvionale costituisce il 36.9% della superficie, registrando un leggero aumento rispetto agli anni precedenti.

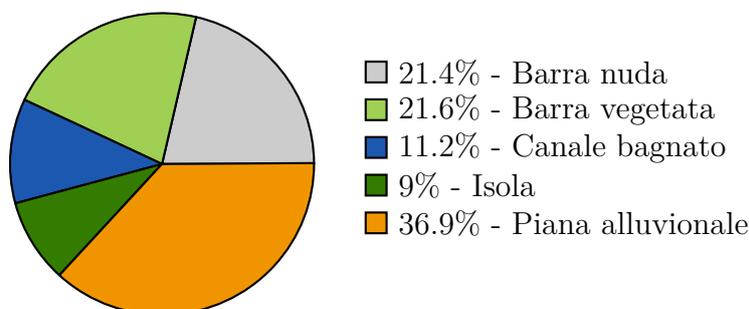


Figura 4.6: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A1 nel 2023

4.1.2 Confronto dei risultati ottenuti nel sottotratto A1

La tabella sottostante (Tabella 4.1) elenca le diverse estensioni delle unità morfologiche rilevate nel sottotratto A1.

Tabella 4.1: Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A1

A1 - Estensione [m^2]			
Unità morfologica	2011	2015	2023
Barra nuda	31,322	66,981	25,740
Barra vegetata	18,005	934	25,938
Canale bagnato	19,676	5619	13,457
Isola	8707	5797	10,836
Piana alluvionale	42,666	41,022	44,332

Mediante il grafico seguente (Figura 4.7), sono state rappresentate le estensioni delle unità riportate precedentemente in Tabella 4.1. Nel grafico si notano le diverse evoluzioni alle quali sono state soggette le unità morfologiche considerate. La barra nuda riporta una forte variazione, nel 2011 si riscontra un'estensione di 31,322 m^2 per poi raddoppiare nel 2015 arrivando a 66,981 m^2 , in seguito nel 2023 il valore scende nuovamente fino a 25,740 m^2 . La barra vegetata nel 2011 si estende su 18,005 m^2 ,

subisce un forte decremento nel 2015, scendendo a 924 m^2 per poi risalire a $25,938 \text{ m}^2$ nel 2023. Il canale bagnato registra il valore più alto nel 2011 pari a $19,676 \text{ m}^2$, per poi scendere nel 2015 fino a 5619 m^2 ed estendersi nuovamente fino a $13,457 \text{ m}^2$ nel 2023. Anche per quanto riguarda l'isola si ha un andamento simile, nel 2011 copre una superficie di 8707 m^2 , riducendosi a 5797 m^2 nel 2015, in seguito nel 2023, si riscontra invece un incremento, registrando anche l'estensione massima pari a $10,836 \text{ m}^2$. Infine l'unità soggetta ad una variazione meno evidente è stata la piana alluvionale, estesa nel 2011 per $42,666 \text{ m}^2$, nel 2015 per $41,022 \text{ m}^2$ e nel 2023 per $44,332 \text{ m}^2$.

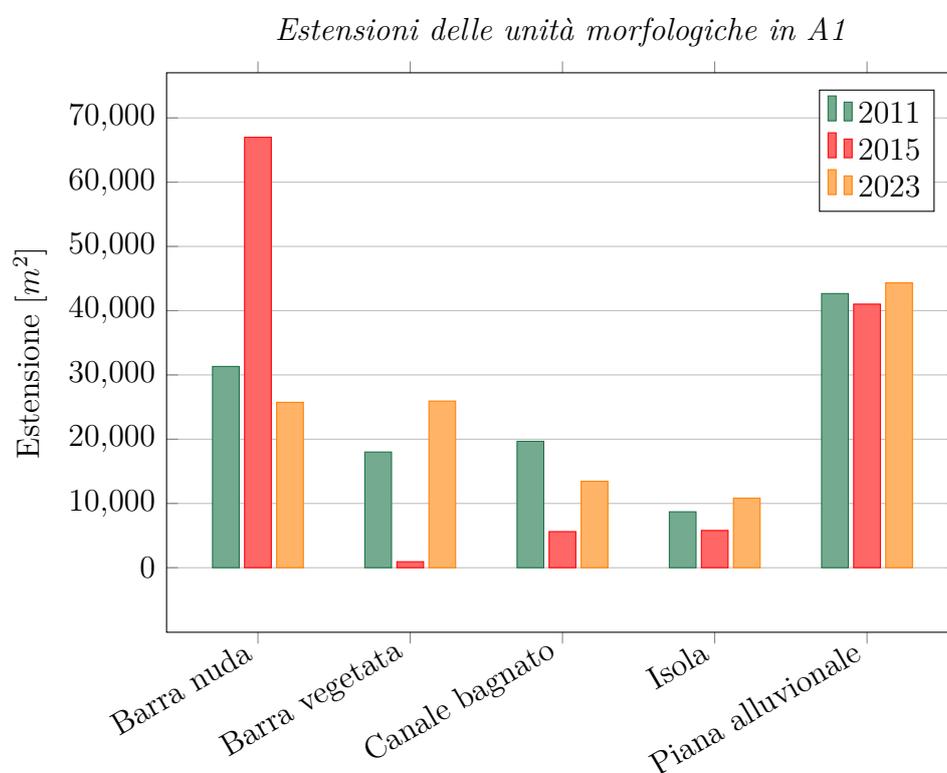


Figura 4.7: Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel 2011,2015 e 2023

4.1.3 Analisi fotointerpretativa nel sottostratto A2 per il 2011, 2015 e 2023

Nel sottotratto A2 si nota (Figura 4.8) una riduzione della barra nuda, attraversata dalle ramificazioni del canale bagnato. Nella parte centrale si registra una presenza moderata di vegetazione bassa che costituisce la barra vegetata. In sinistra idrogra-

fica, invece, prevale la vegetazione matura, contribuendo alla formazione di un'isola. Nella restante parte di destra idrografica si individua la piana alluvionale.

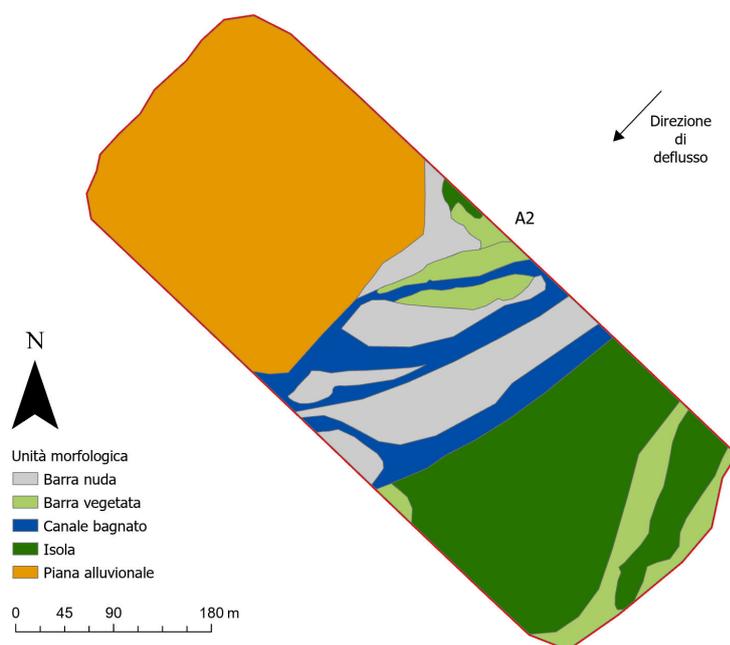


Figura 4.8: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2011

Dal grafico sottostante (Figura 4.9) si nota che il 26.8% della superficie è costituita dall'isola, unità morfologica prevalente. Di estensione minore, invece, si trova la barra nuda, la quale copre il 14.2% e ulteriormente inferiore la barra vegetata, corrispondente all'8.6%. In aggiunta, il 10.3% della superficie è interessata dal canale bagnato. Infine, la restante porzione del sottotratto vede il 40.1% della superficie occupata dalla piana alluvionale.

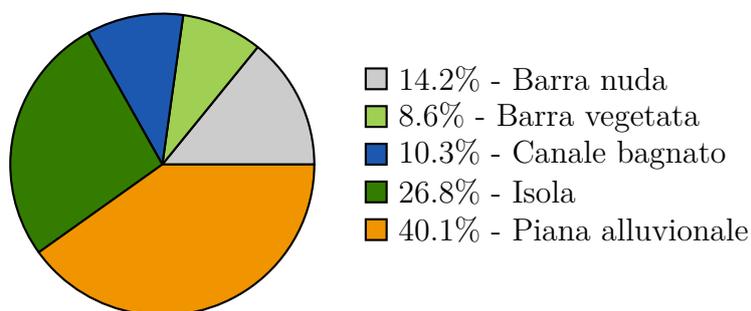


Figura 4.9: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2011

Nel 2015 nel sottotratto A2 (Figura 4.10) si nota una prevalenza di barra nuda nel tratto centrale, nella quale è presente una porzione occupata dal canale bagnato, concentrato per lo più in un unico percorso situato in sinistra idrografica. Per quanto

riguarda la vegetazione si riscontra una quasi assenza nella parte centrale, e la si vede per lo più concentrata in sinistra idrografica, dove è soggetta a due azioni, ovvero: eliminazione di una parte in prossimità del canale bagnato e consolidamento della vegetazione presente. Questo lo si nota dalla prevalenza di superficie considerata isola, ed in minore quantità di quella considerata barra vegetata.

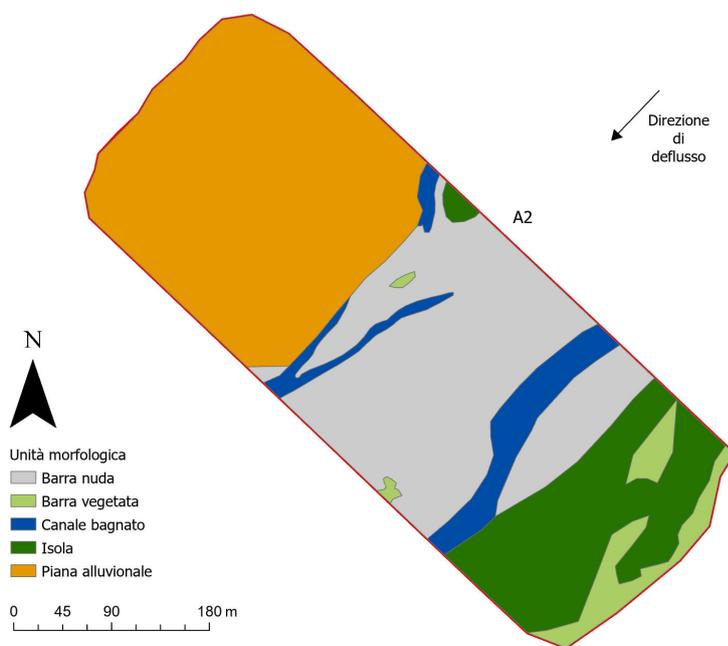


Figura 4.10: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2015

Quanto detto lo si può notare anche nel grafico sottostante (Figura 4.11) il quale riporta un 32.8% di superficie occupata da barra nuda, costituendo l'unità morfologica prevalente nel canale attivo. Al contrario, la superficie della barra vegetata è ridotta, registrando un 4.7%. Il canale bagnato va a ridursi rispetto all'anno precedente, scendendo al 6.5%. Infine, all'interno del canale attivo, si trova l'isola, la quale ricopre il 14.4%. Per quanto riguarda la piana alluvionale, si estende solamente in destra idrografica occupando il 39.7% del sottotratto.

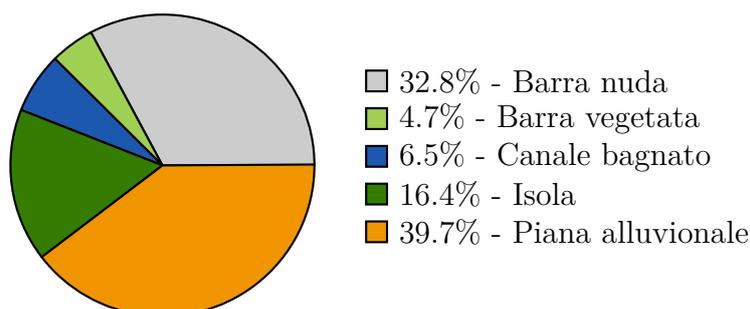


Figura 4.11: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2015

Nel 2023 (Figura 4.12) si nota un'importante crescita della vegetazione, seppur giovane e principalmente erbacea, nella parte centrale del sottotratto in questione. La barra nuda identificata negli anni precedenti mostra ora, in gran parte della sua superficie la presenza della vegetazione. Invece, nella parte in sinistra idrografica, persiste ancora una porzione di barra nuda. Le isole presenti sono di dimensioni ridotte e posizionate in modo sparso all'interno del canale attivo, un aspetto importante lo si nota in sinistra idrografica. La precedente superficie considerata isola (Figura 4.10) ha visto una forte espansione e consolidamento, tanto da definirla nel 2023 piana alluvionale. Infine, per quanto riguarda il canale bagnato, si riscontra uno spostamento verso la parte centrale del canale attivo, ma non registra particolari espansioni.

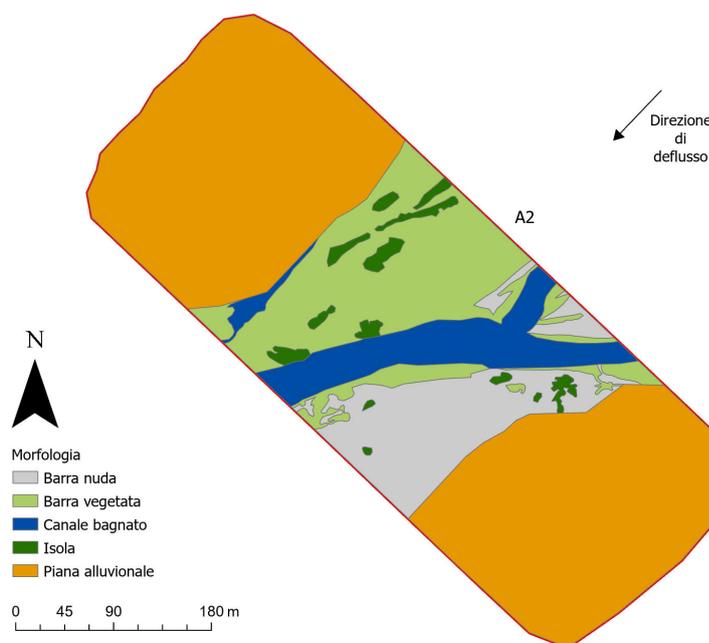


Figura 4.12: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A2 nel 2023

Nel grafico seguente (Figura 4.13) si osserva che il 12.2% della superficie è occupato da barra nuda, mentre la barra vegetata risulta più estesa raggiungendo il 19.4%. Il canale bagnato mostra una crescita rispetto alla situazione precedente (Figura 4.11), occupando l'8.4% della superficie. L'isola, invece, la si trova significativamente ridotta coprendo solo il 2.2% della superficie, poiché è stata sostituita dalla piana alluvionale. Quest'ultima ha infatti registrato una forte espansione arrivando a coprire il 57.8% della superficie.

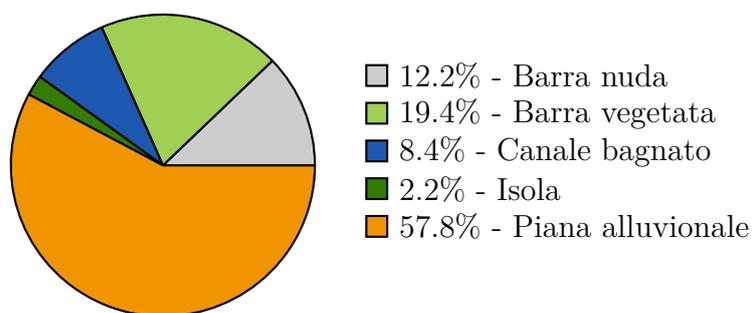


Figura 4.13: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A2 nel 2023

4.1.4 Riassunto dei risultati ottenuti nel sottotratto A2

Nella tabella sottostante (Tabella 4.2) si riportano le estensioni che hanno caratterizzato le diverse unità morfologiche considerate nel sottotratto A2 per i tre anni di analisi.

Tabella 4.2: Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A2

A2 - Estensione [m^2]			
Unità morfologica	2011	2015	2023
Barra nuda	22,610	52,099	19,365
Barra vegetata	13,687	7394	30,832
Canale bagnato	16,443	10,238	13,393
Isola	42,560	25,945	3546
Piana alluvionale	63,705	63,002	92,017

Con la rappresentazione di tali estensioni (Figura 4.14) si può osservare l'andamento delle variazioni. La barra nuda, nel 2011, copre una superficie di $22,610 m^2$, per poi aumentare nel 2015 fino a $52,099 m^2$, ed in seguito nel 2023 diminuire fortemente fino a $19,365 m^2$. Al contrario, la barra vegetata ha seguito un andamento opposto, estendendosi su $13,687 m^2$ nel 2011, riducendosi a $7394 m^2$ nel 2015, per poi aumentare fino a $30,832 m^2$ nel 2023. Il canale bagnato appare poco variabile, registrando una superficie totale di copertura pari a $16,443 m^2$ nel 2011, a $10,238 m^2$ nel 2015 e a $13,393 m^2$ nel 2023. L'isola, invece, ha subito una costante diminuzione, partendo da $42,560 m^2$ nel 2011, arrivando a $25,945 m^2$ nel 2015 ed a $3546 m^2$ nel 2023. Per quanto riguarda la piana alluvionale, la superficie pare stabilizzarsi tra

il 2011 ed il 2015, occupando una superficie rispettivamente di $63,705 m^2$ e $63,002 m^2$, mentre si espande nel 2023 raggiungendo il valore di $92,017 m^2$.

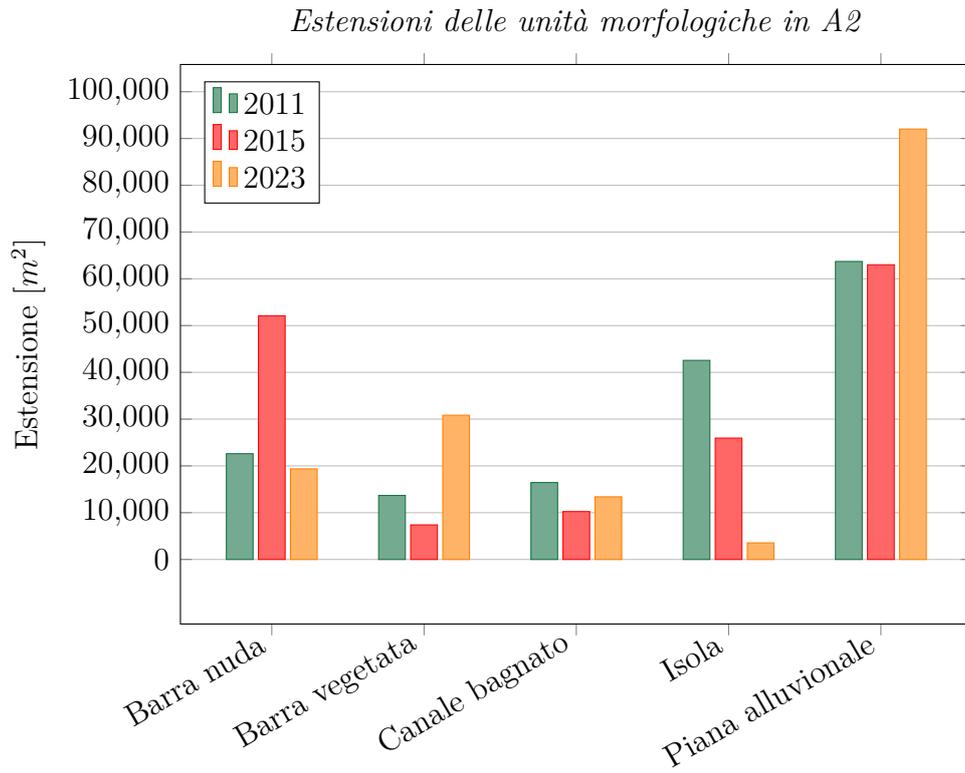


Figura 4.14: Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel sottotratto A2

4.1.5 Analisi fotointerpretativa nel sottotratto A3 per il 2011, 2015 e 2023

Il sottotratto A3 (Figura 4.15) si presenta fin da subito con una complessità più elevata rispetto ai sottotratti precedenti. Si nota una suddivisione dei canali bagnati, i quali sono separati nella parte in destra idrografica da una barra nuda. In sinistra idrografica, invece, si individua un'interrelazione di barre vegetate ed isole. Per quanto riguarda la piana alluvionale, essa occupa solamente la porzione di destra idrografica.

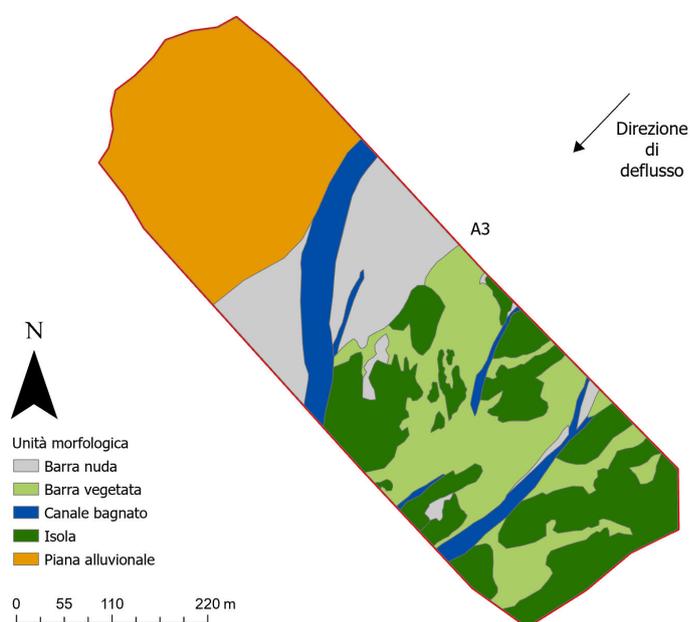


Figura 4.15: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2011

Analizzando le estensioni (Figura 4.16), si nota che la barra nuda occupa il 15% della superficie, invece di dimensione maggiore è la barra vegetata pari al 21.7%. L'isola, nonostante si presenti frammentata nella parte centrale, supera l'estensione della barra vegetata, registrando un 25%. Il canale bagnato invece rappresenta l'estensione minore, occupando solamente l'8.1%. Infine, la piana alluvionale va ad estendersi sul 30.2% della superficie totale.

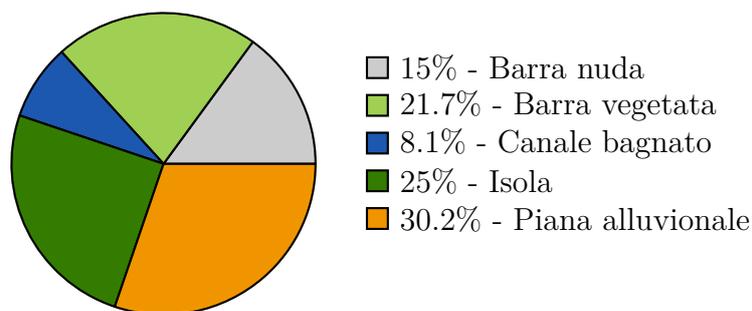


Figura 4.16: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2011

Nel 2015 (Figura 4.17) si nota un'estensione del canale attivo, a seguito di una modifica della piana alluvionale in destra idrografica rispetto al 2011 (Figura 4.15). Questo cambiamento ha permesso lo spostamento del canale bagnato in prossimità della piana e l'espansione della barra nuda. La parte in sinistra idrografica vede la presenza di due ramificazioni del canale bagnato, alternati principalmente da isole, barre vegetate e, per una superficie minore, da barre nude.

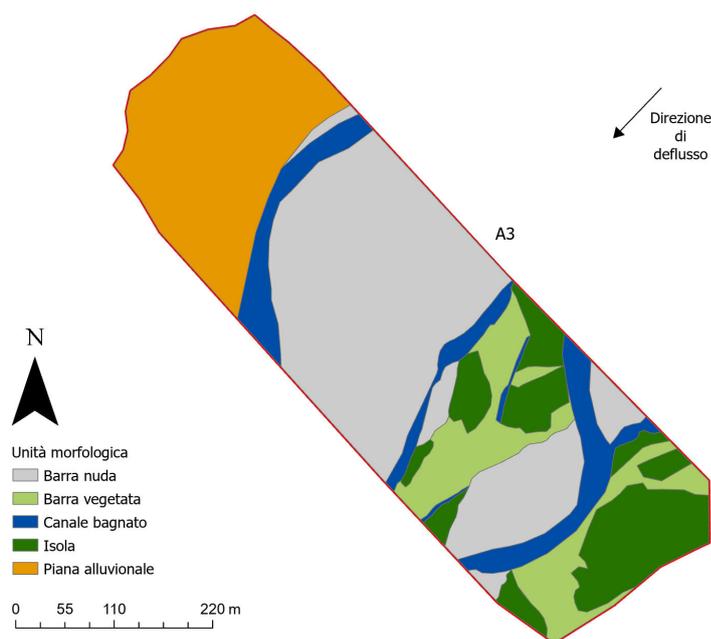


Figura 4.17: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2015

In Figura 4.18 si nota una prevalenza di barra nuda, la quale occupa il 40.6% della superficie. In minoranza, invece, si trovano la barra vegetata con l'11.6% e l'isola con il 14.4%. Il canale bagnato, invece, rispetto al 2011 (Figura 4.16) ha visto un'espansione, arrivando al 10.5%. Infine, si è riscontrata una riduzione della piana alluvionale, passando dal 30.2% (Figura 4.16) al 22.9% nel 2015.

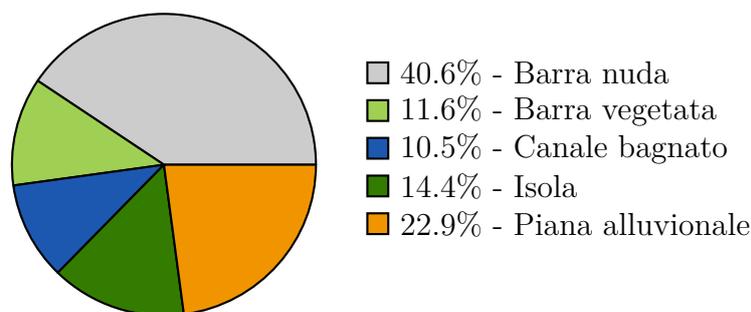


Figura 4.18: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2015

Nel 2023 (Figura 4.19) si nota un'ulteriore diminuzione della piana alluvionale in destra idrografica dovuta all'erosione della sponda. Rispetto al 2015 (Figura 4.17) si osserva una crescita della vegetazione che copre quasi tutta la superficie. Questo ha comportato una particolare estensione della barra vegetata. La presenza di vegetazione matura è minore nella parte in destra idrografica ed al centro del canale attivo. Quest'ultima la si trova per lo più concentrata sulla sinistra idrografica; inoltre, parte di tale vegetazione matura con il continuo consolidamento ha contribuito alla formazione della piana alluvionale in sinistra idrografica.

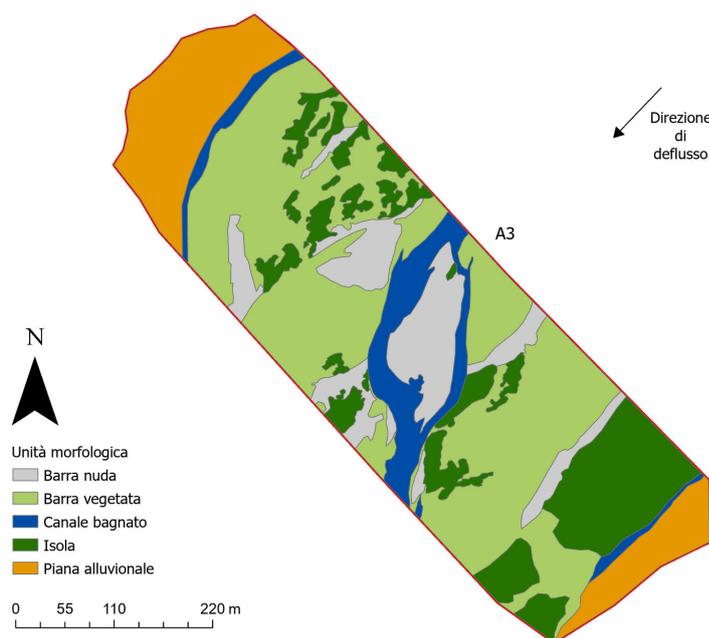


Figura 4.19: Individuazione delle diverse forme presenti nell'A3 nel 2023

Dalla Figura 4.20, si nota una particolare estensione della barra vegetata, la quale va a coprire il 45.1% dell'intero sottotratto. Caratterizzate, invece, da una dimensione minore sono la barra nuda e l'isola, rispettivamente con una percentuale di 12.8% e 18.8%. Si riscontra poi, una riduzione sia per il canale bagnato, il

quale occupa l'8.3%, che per la piana alluvionale che diminuisce rispetto al 2015 (Figura 4.18) coprendo il 15% della superficie.

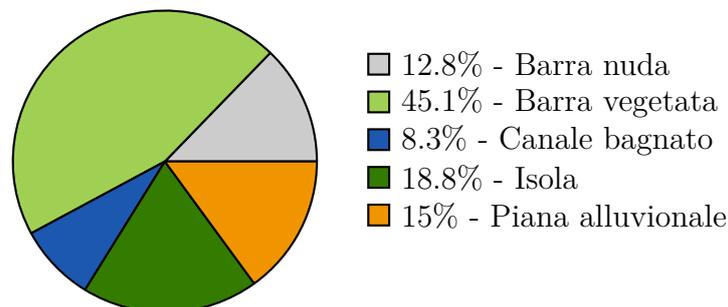


Figura 4.20: Estensione percentuale delle unità morfologiche nel sottotratto A3 nel 2023

4.1.6 Confronto dei risultati ottenuti nel sottotratto A3

Infine, anche per l'ultimo sottotratto A3 si riportano le estensioni relative alle unità morfologiche analizzate (Tabella 4.3).

Tabella 4.3: Estensioni delle unità morfologiche riscontrate nel sottotratto A3

A3 - Estensione [m^2]			
Unità morfologica	2011	2015	2023
Barra nuda	29,765	80,448	25,383
Barra vegetata	42,884	22,865	89,186
Canale bagnato	16,026	20,852	16,494
Isola	49,381	28,456	37,225
Piana alluvionale	59,845	45,295	29,606

Dal grafico seguente (Figura 4.21) si osservano diverse variazioni. La barra nuda, inizialmente estesa su una superficie di $29,765 m^2$ nel 2011, aumenta notevolmente a $80,448 m^2$ nel 2015, per poi ridursi a $25,383 m^2$ nel 2023. La barra vegetata, che nel 2011 copriva una superficie di $42,884 m^2$, si riduce a $22,865 m^2$ nel 2015, ma mostra un forte aumento nel 2023, raggiungendo $89,186 m^2$. Il canale bagnato si mantiene stabile, occupando una superficie di $16,026 m^2$ nel 2011, $20,852 m^2$ nel 2015 e $16,494 m^2$ nel 2023. Per quanto concerne l'isola, la massima estensione si è registrata nel 2011, pari a $49,381 m^2$, per poi scendere nel 2015 fino a $28,456 m^2$. Nel 2023, la stessa unità morfologica è nuovamente aumentata fino a raggiungere i

37,225 m^2 . Infine, la piana alluvionale ha subito una riduzione nel corso degli anni. Partendo da 59,845 m^2 nel 2011, la sua superficie è diminuita a 45,295 m^2 nel 2015 ed ha subito un'ulteriore riduzione fino a 29,606 m^2 nel 2023.

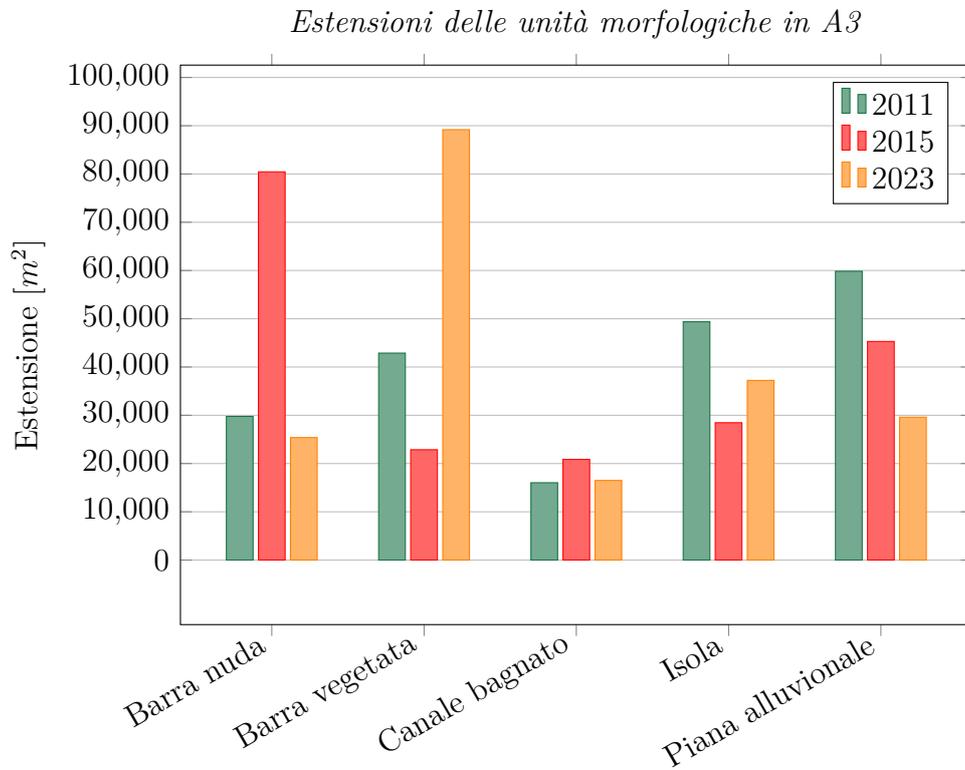


Figura 4.21: Confronto dell'estensione tra le diverse unità morfologiche nel sottotratto A3

4.2 Risultati ottenuti mediante DoD

Nel presente capitolo verranno riportati i risultati ottenuti dal computo del DoD mediante il tool GCD per ciascun sottotratto. Questi risultati consentono una stima della quantificazione dei fenomeni di erosione e deposizione individuati nelle tre sezioni oggetto di studio per l'intervallo di tempo 2011-2023.

4.2.1 Risultati per il sottotratto A1

La Figura 4.22 mostra i diversi punti all'interno del canale attivo nei quali si è verificata erosione o deposizione nel sottotratto A1 tra il 2011 ed il 2023. Per prima cosa si nota una prevalente deposizione in quasi tutta l'area considerata, ad eccezione di alcune superfici. In particolare, nella parte centrale del canale attivo si è verificato un elevato approfondimento che ha comportato lo spostamento del canale bagnato. Lo stesso fenomeno si è verificato in sinistra idrografica, con conseguente perdita delle isole presenti e formazione di barre nude e vegetate. Quanto detto lo si può notare anche nelle immagini riportate precedentemente nell'analisi fotointerpretativa, precisamente tra la Figura 4.1 e la Figura 4.5.

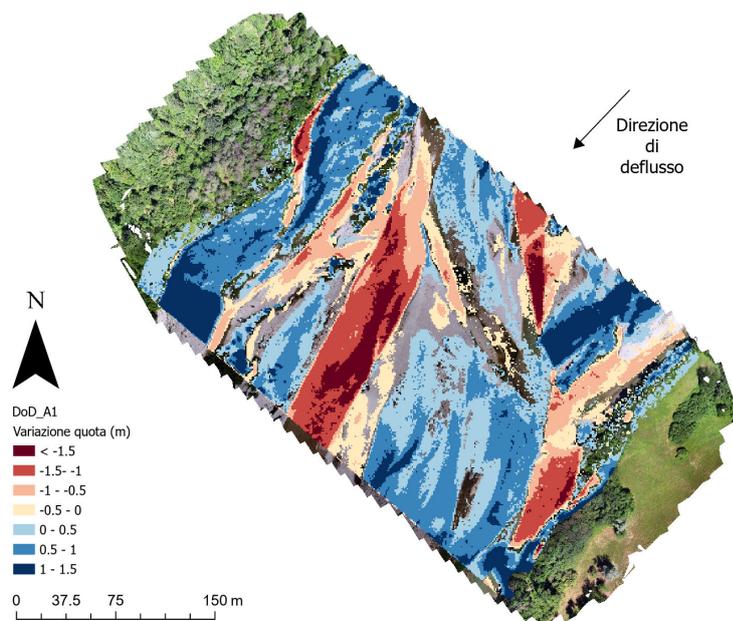


Figura 4.22: Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A1 avvenuti tra il 2011 ed il 2023

Oltre alla rappresentazione a livello planimetrico, il GCD permette di estrarre i risultati numerici. Dal grafico in Figura 4.24 si osserva la distribuzione volumetrica sia per quanto riguarda l'erosione che la deposizione. In particolare, si evidenzia, per la deposizione, che il maggior contributo di sedimento, pari a $2908 m^3$ ha comportato una variazione di elevazione pari a $+0.6 m$, identificabile nel picco positivo del grafico. Per quanto riguarda l'erosione, invece, il volume maggiore di erosione ($-2243 m^3$), ha comportato una perdita di elevazione di $1.4 m$.

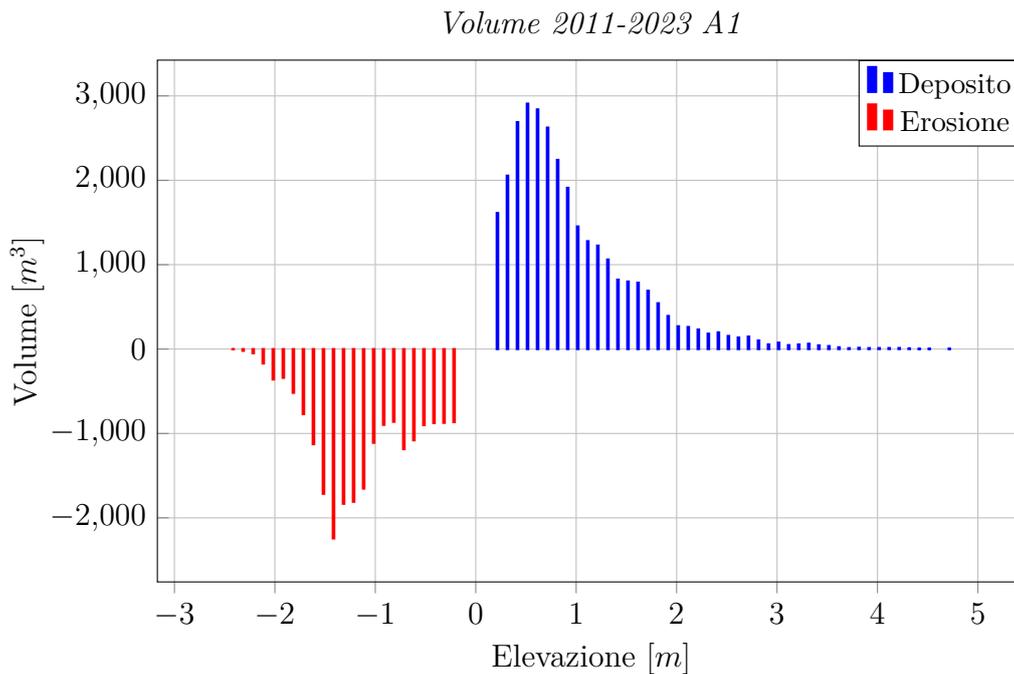


Figura 4.23: Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A1

Il grafico in Figura 4.24 riporta i risultati complessivi relativi al volume di erosione, di deposizione, e di volume netto. I risultati ottenuti riportano un volume eroso totale pari a $21,272 m^3 \pm 4926 m^3$ (23%) ed un volume depositato pari a $30,130 m^3 \pm 8752 m^3$ (29%). Infine, il volume netto derivante da essi è stato pari a $8858 m^3 \pm 10,044 m^3$ (113%).

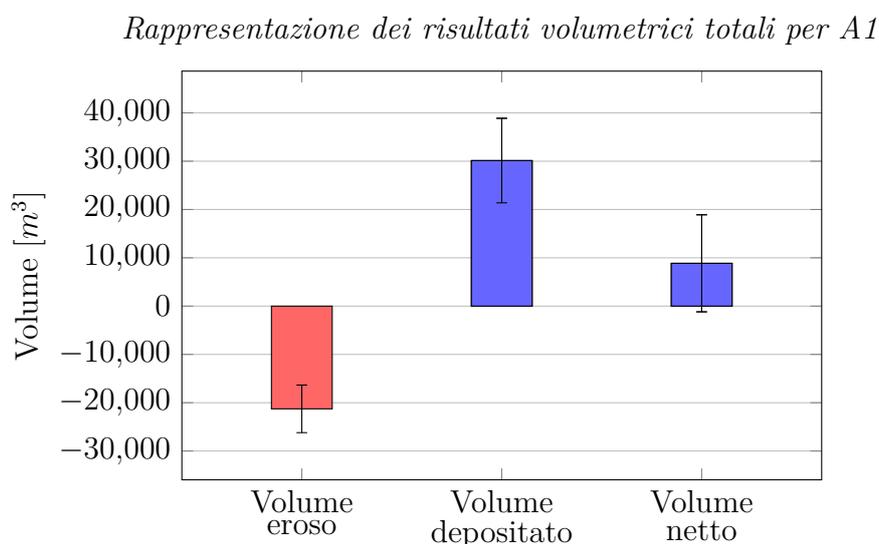


Figura 4.24: Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023

Osservando i risultati areali (Figura 4.25) si nota che l'erosione maggiore, che ha provocato un cambio di elevazione di circa 0.3 m ha interessato una superficie massima di 3485 m^2 . Per quanto riguarda la deposizione, questa si mostra prevalente, definendo per lo più un aumento di quota pari a 0.3 m su una superficie di 6457 m^2 .

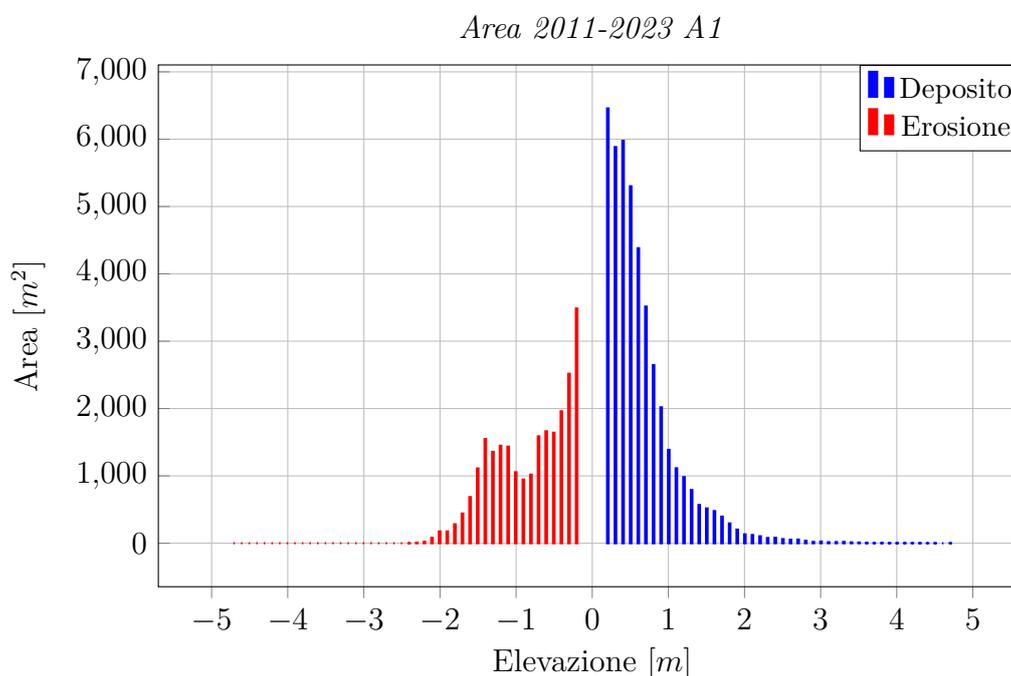


Figura 4.25: Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A1

Di seguito, si osservano i risultati areali complessivi (Figura 4.26), da quest'ultimi si nota che la superficie all'interno del sottotratto A1 interessata da erosione è pari a $24,634\text{ m}^2$ mentre, la deposizione, si è verificata su un'area di $43,764\text{ m}^2$.

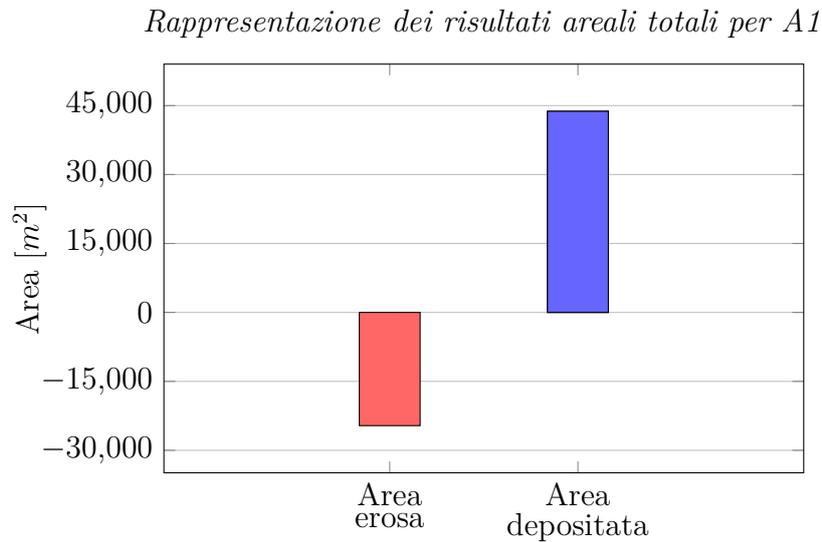


Figura 4.26: Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023

I risultati numerici riguardo l'elevazione (Figura 4.27) hanno riportato una riduzione di quota media di $-0.86\text{ m} \pm 0.2\text{ m}$ (23%) ed un aumento di $0.69\text{ m} \pm 0.2\text{ m}$ (29%). La colonna C evidenzia la variazione altimetrica media netta all'interno dell'area con cambiamenti rilevabili, ovvero al di sopra del *minLOD*. Questo ha restituito un valore positivo netto pari a $0.13\text{ m} \pm 0.15\text{ m}$ (113%).

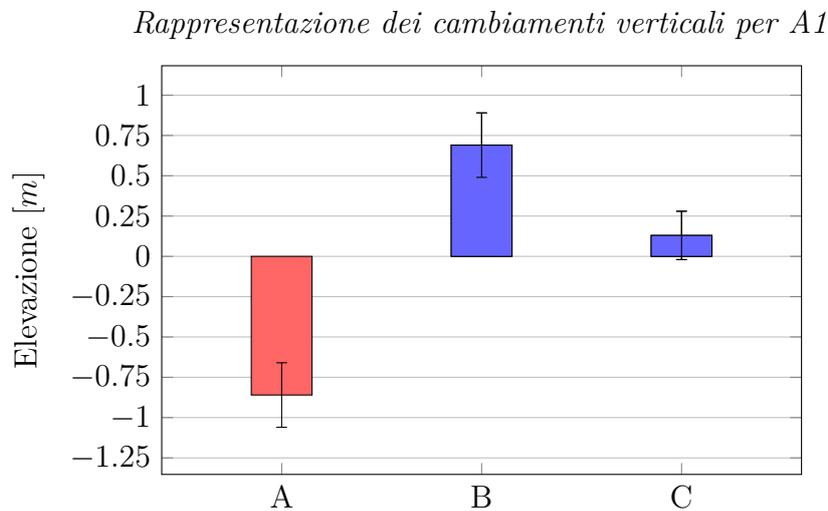


Figura 4.27: Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.1

Il grafico in Figura 4.28 mostra l'andamento della sezione trasversale nei due diversi periodi di interesse. La sezione si estende dalla piana alluvionale di destra idrografica, corrispondente al valore 0 dell'asse x, fino alla piana alluvionale di sinistra idrografica. Il grafico evidenzia due diverse porzioni, ovvero: il canale attivo,

che mostra una certa variabilità tra il 2011 e 2023, esteso da una distanza di circa 40 m a 340 m e le pianure alluvionali, quasi equivalenti per i due periodi. Analizzando il canale attivo, si possono individuare le posizioni del canale bagnato principale, e, a seconda della profondità, eventuali canali bagnati secondari. Nel profilo del 2011, partendo dalla destra idrografica, si trova il primo canale bagnato, con il punto più profondo posizionato ad una distanza di circa 60 m. In seguito, nel 2023 il punto più profondo è retrocesso a 50 m e si è formato un ulteriore canale bagnato subito dopo la barra, estendendosi tra i 130 m e 160 m di distanza. Infine, spostandosi in sinistra idrografica, si nota il canale bagnato principale, caratterizzato da una larghezza e profondità maggiori rispetto ai precedenti. Nel 2011 il punto più profondo (*thalweg*) è posizionato ad una distanza di circa 290 m, mentre nel 2023, è soggetto ad uno spostamento ad una distanza di circa 330 m.

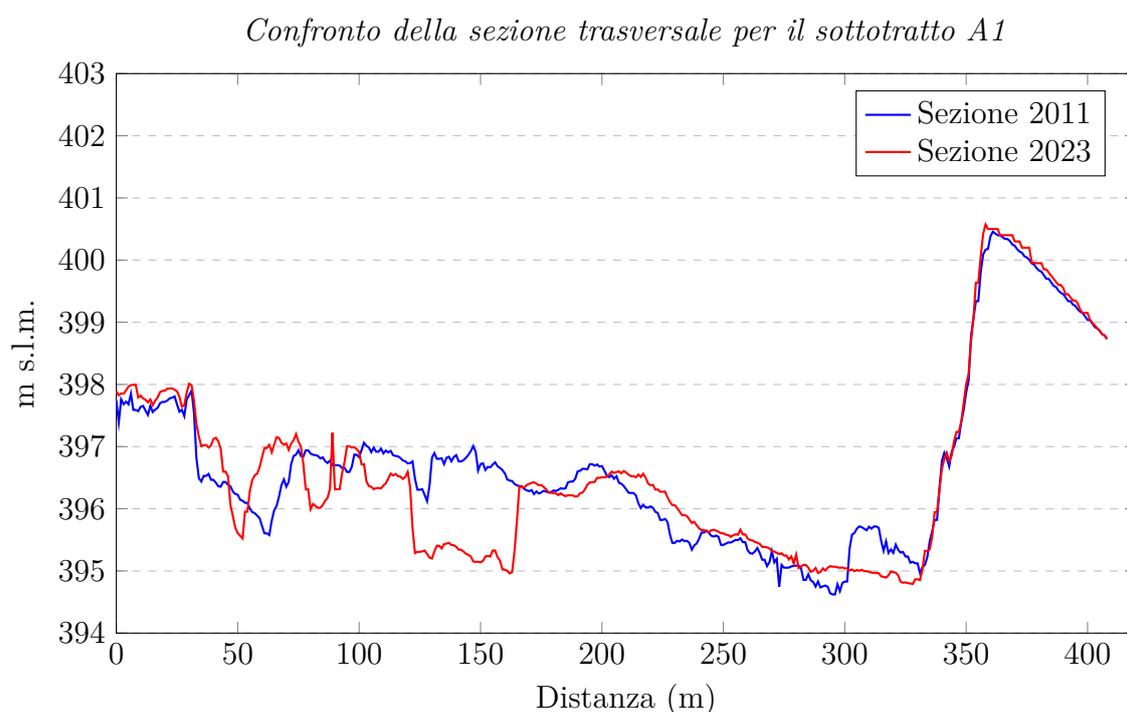


Figura 4.28: Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A1, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)"

La tabella seguente (Tabella 4.4), riassume i risultati numerici ottenuti dall'elaborazione mediante GCD e successivamente utilizzati per le rappresentazioni grafiche riportate precedentemente.

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva per il sottotratto A1 ottenuta mediante GCD

Parametri	Stima DoD:		
AREALI:			
Area totale erosa (m ²)	24,634		
Area totale depositata (m ²)	43,764		
Area totale con variazioni rilevabili (m ²)	63,398		
Area totale di interesse (m ²)	87,257		
Percentuale dell'area di interesse con variazioni rilevabili	78%		
VOLUMETRICI:			
		\pm Errore (m ³)	% Errore
Volume totale eroso (m ³)	21,272	4926	23%
Volume totale depositato (m ³)	31,312	8753	29%
Volume totale (m ³)	51,403	13,680	27%
Volume netto (m ³)	8859	10,044	113%
CAMBIAMENTI VERTICALI:			
		\pm Errore (m)	% Errore
Quota media erosa (m)	0.86	0.20	23%
Quota media depositata (m)	0.69	0.20	29%
Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili	0.13	0.15	113%
PERCENTUALI (DA VOLUME)			
Percentuale di erosione	41%		
Percentuale di deposito	59%		

4.2.2 Risultati per il sottotratto A2

Dalla Figura 4.29 si nota che il sottotratto tra il 2011 ed il 2023, è stato soggetto ad una prevalente deposizione, estesa per lo più in destra idrografica, tra la piana alluvionale e l'inizio del canale bagnato, posto centralmente, portando alla formazione di barre. Nella parte in sinistra idrografica, si è verificata per lo più erosione, dalla quale si può evincere il posizionamento del canale bagnato. Quanto detto, è inoltre possibile, ritrovarlo nell'analisi precedente in Figura 4.12.

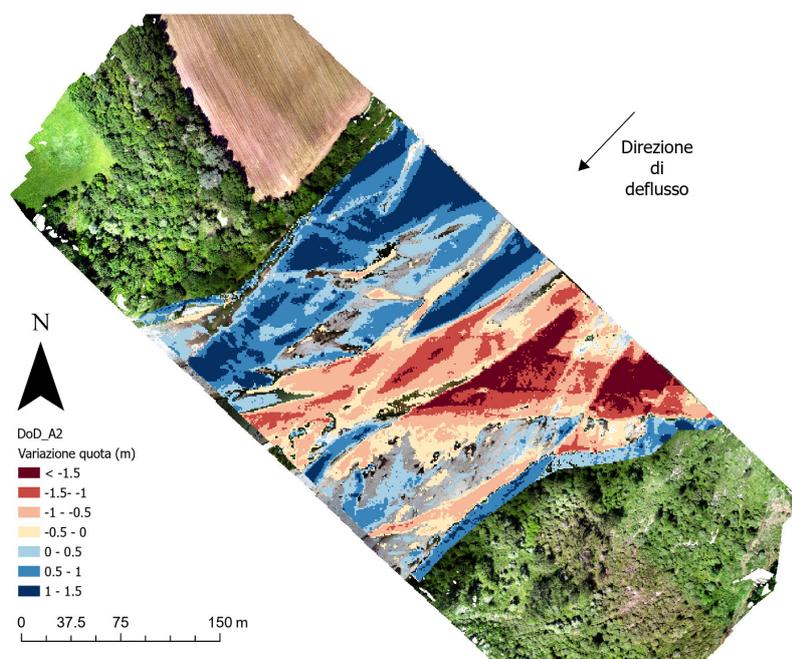


Figura 4.29: Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A2 avvenuti tra il 2011 ed il 2023

Osservando la variazione volumetrica (Figura 4.30), si nota che per quanto riguarda l'erosione, la maggior quantità di sedimento pari a -1003 m^3 è stata asportata comportando in gran parte un cambio d'elevazione di circa -1 m . La deposizione, invece, ha visto un valore massimo di 1031 m^3 derivante da un aumento di quota pari a 1.15 m .

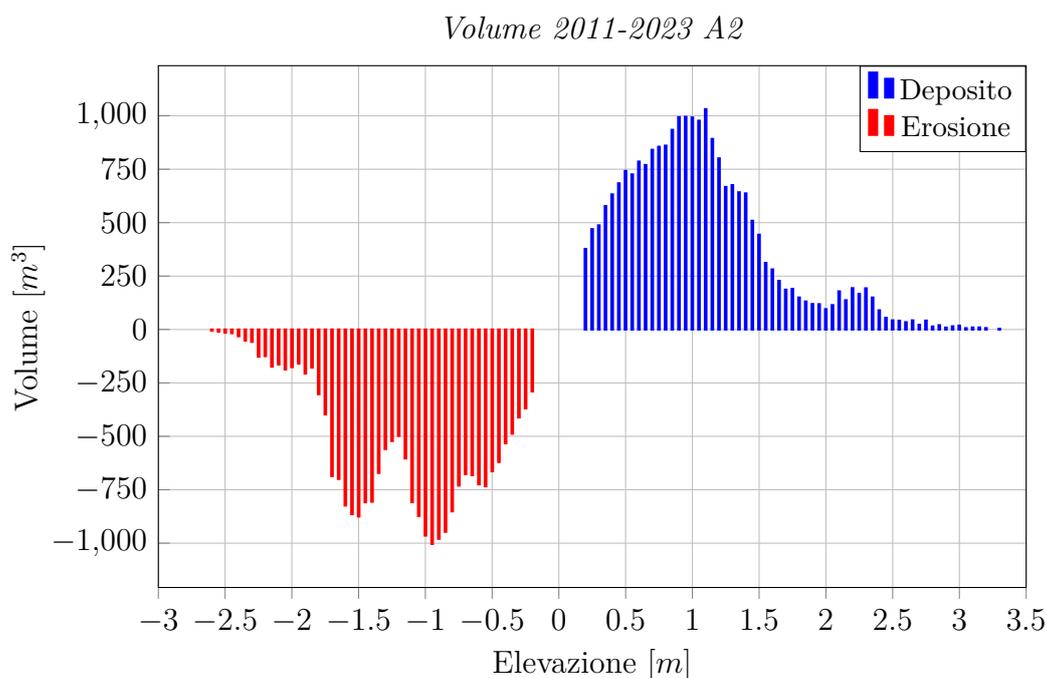


Figura 4.30: Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A2

Analizzando i risultati complessivi dei volumi (Figura 4.31) si è riscontrato un volume totale eroso pari a $24,152 \text{ m}^3 \pm 5602 \text{ m}^3$ (23%), il volume depositato è pari a $23,417 \text{ m}^3 \pm 5883 \text{ m}^3$ (25%). Da questi, infine, è stato calcolato il volume netto, pari a $-735 \text{ m}^3 \pm 8124 \text{ m}^3$ (-1105%).

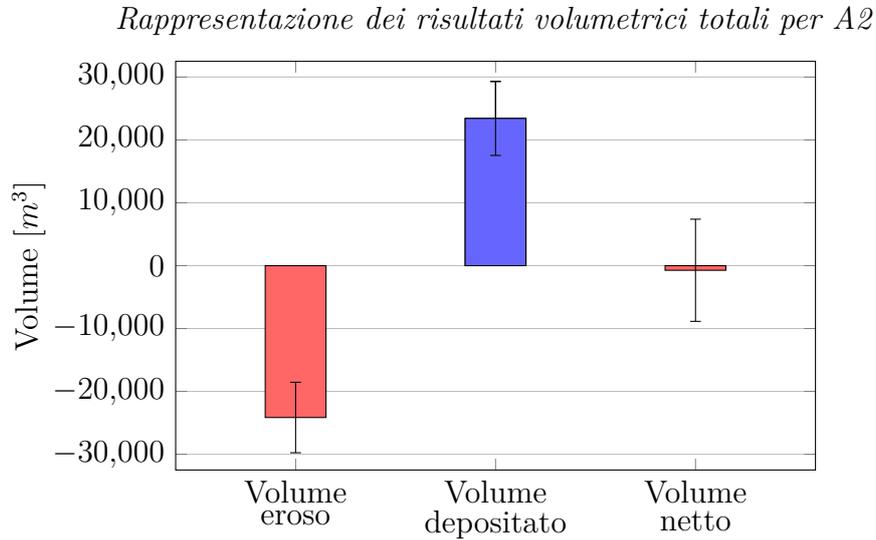


Figura 4.31: Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023

I risultati areali per il sottotratto A2 (Figura 4.32), mostrano che la variazione altimetrica maggiore all'interno dell'area ha comportato una perdita di -0.25 m , interessando una superficie pari a 1341 m^2 . La deposizione, invece, ha definito per lo più un guadagno altimetrico pari a 0.3 m su una superficie massima di 1709 m^2 .

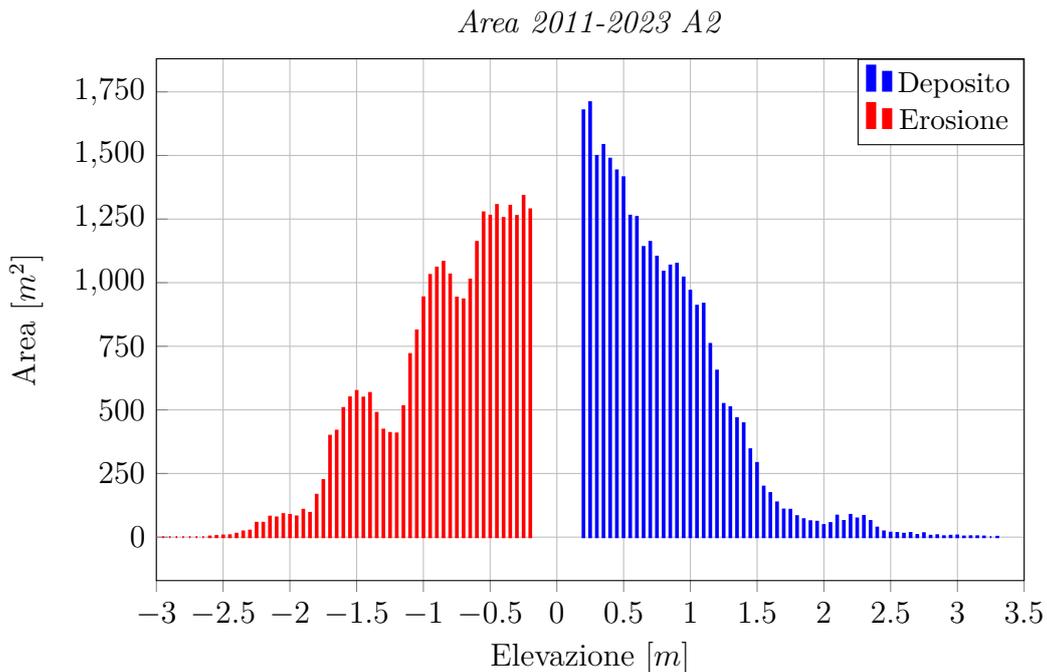


Figura 4.32: Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A2

I risultati areali complessivi (Figura 4.33), danno conferma di quanto visto con la distribuzione areale. Infatti, nel sottotratto A2 si ha l'erosione inferiore alla deposizione, registrando un valore pari a $28,012 \text{ m}^2$ e $29,416 \text{ m}^2$, rispettivamente.

Rappresentazione dei risultati areali totali per A2

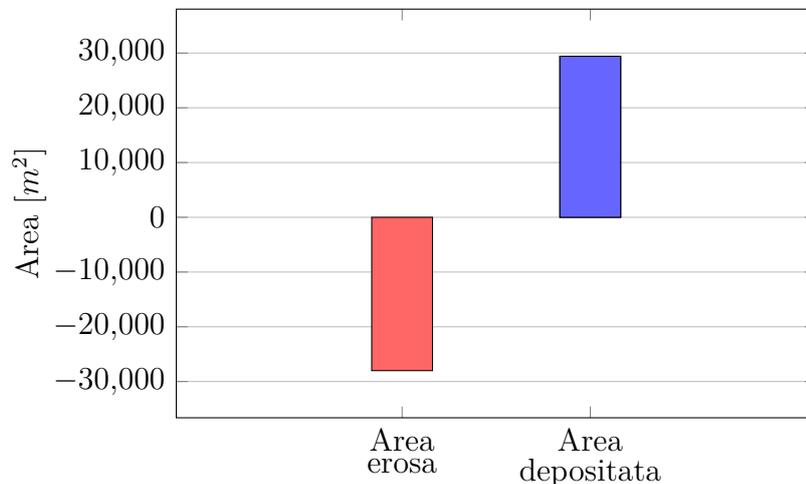


Figura 4.33: Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023

Per quanto riguarda i cambiamenti verticali (Figura 4.34), all'interno del canale attivo si è verificato un abbassamento medio di $-0.86 \text{ m} \pm 0.20 \text{ m}$ (23%), la deposizione invece ha comportato un cambio verticale positivo, pari a $0.80 \text{ m} \pm 0.20 \text{ m}$ (25%). Analizzando solamente i cambiamenti rilevabili, corrispondenti alla colonna C, per una precisione migliore; si riscontra un abbassamento medio all'interno del canale attivo pari a $-0.01 \text{ m} \pm 0.14 \text{ m}$ (-1105%)

Rappresentazione dei cambiamenti verticali per A2

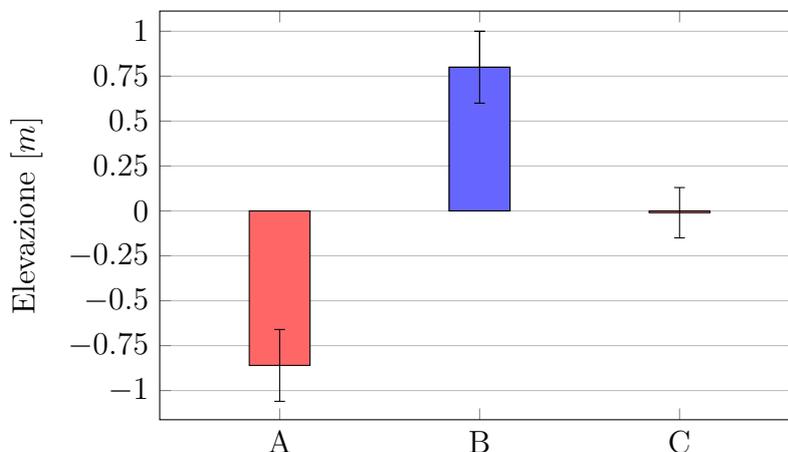


Figura 4.34: Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.2

Osservando il confronto delle sezioni trasversali (Figura 4.35), si nota una piana alluvionale di destra idrografica stabile tra i due periodi, la quale si estende fino a circa 30 m. All'interno del canale attivo, subito dopo la piana alluvionale si osserva un innalzamento della superficie nel 2023 rispetto al 2011, con conseguente formazione di barre e scomparsa del canale bagnato, presente nel 2011. Nel 2023, il canale bagnato lo si nota ad una distanza di circa 160 m, e prosegue poi fino a 260 m. Continuando, poi, verso la sinistra idrografica si incontra un'ulteriore zona di barre. Infine, dopo tale zona, non si vede la presenza della piana alluvionale ma di un'isola, caratterizzata da un aumento di quota, dovuto alla crescita della vegetazione tra il 2011 ed il 2023.

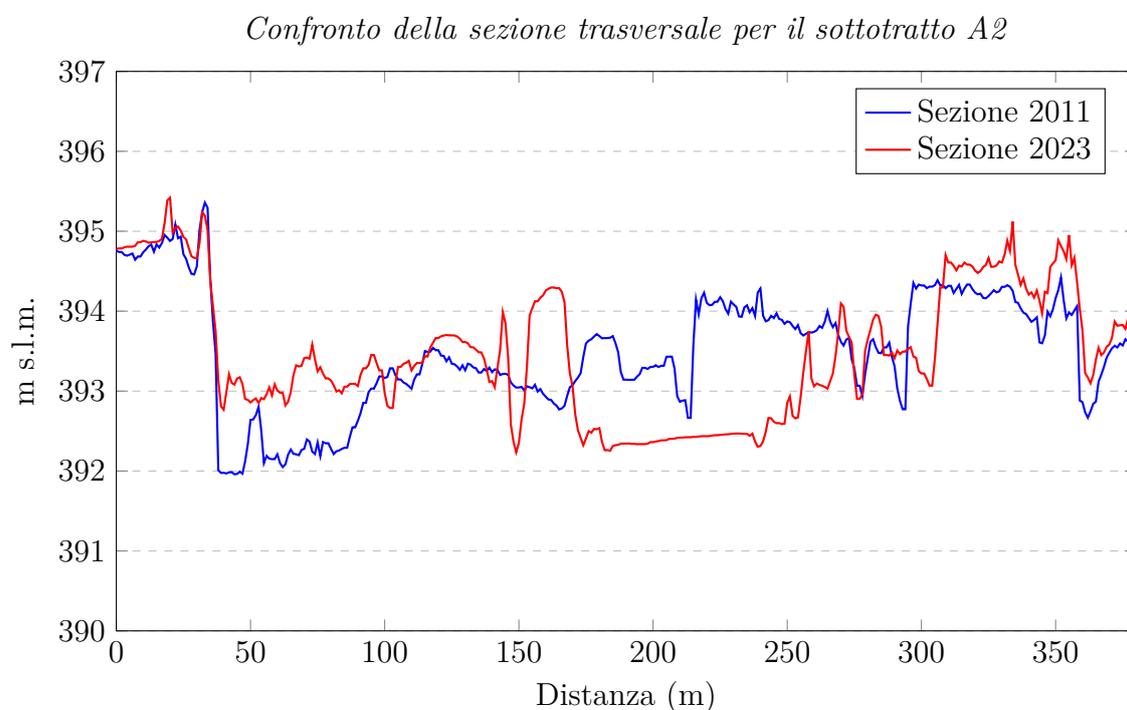


Figura 4.35: Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A2, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)"

Infine, dalla seguente tabella (Tabella 4.5) si possono osservare tutti i risultati ottenuti per ogni parametro considerato precedentemente.

Tabella 4.5: Tabella riassuntiva per il sottotratto A2 ottenuta mediante GCD

Parametri	Stima DoD:		
AREALI:			
Area totale erosa (m ²)	28,012		
Area totale depositata (m ²)	29,416		
Area totale con variazioni rilevabili (m ²)	57,428		
Area totale di interesse (m ²)	70,251		
Percentuale dell'area di interesse con variazioni rilevabili	82%		
VOLUMETRICI:			
		\pm Errore (m ³)	% Errore
Volume totale eroso (m ³)	24,152	5,602	23%
Volume totale depositato (m ³)	23,417	5,883	25%
Volume totale (m ³)	47,569	11,486	24%
Volume netto (m ³)	-735	8,124	-1105%
CAMBIAMENTI VERTICALI:			
		\pm Errore (m)	% Errore
Quota media erosa (m)	0.86	0.20	23%
Quota media depositata (m)	0.80	0.20	25%
Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili	-0.01	0.14	-1105%
PERCENTUALI (DA VOLUME)			
Percentuale di erosione	51%		
Percentuale di deposito	49%		

4.2.3 Risultati per il sottotratto A3

La Figura 4.36 mostra all'interno dell'ultimo sottotratto in esame, le dinamiche avvenute tra il 2011 ed il 2023. In destra idrografica si è verificata una forte erosione, che ha comportato la riduzione della piana alluvionale, tale variazione è osservabile in Figura 4.15 e Figura 4.19. Si incontra poi un'area soggetta a deposizione, la quale ha comportato il riempimento del canale bagnato e la formazione di barre nel 2023. A causa di questa forte deposizione all'interno del canale bagnato in destra idrografica, si è visto il suo spostamento nella parte centrale del sottotratto, individuabile dalla porzione di superficie soggetta ad erosione. Infine, in sinistra idrografica si nota sia un'ulteriore deposizione, responsabile della formazione di barre che erosione, la quale ha comportato la perdita di barre vegetate ed isole.

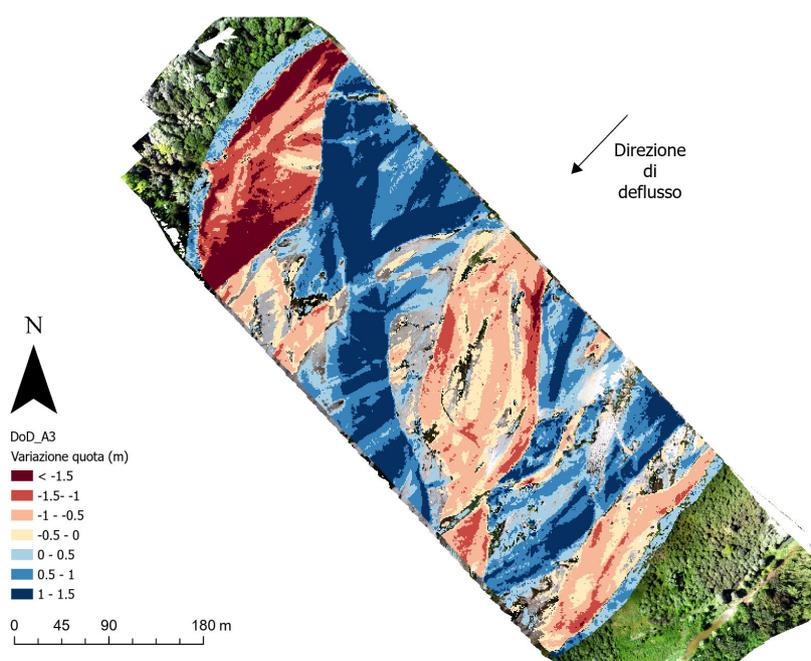


Figura 4.36: Rappresentazione planimetrica dei fenomeni di erosione e deposizione nel sottotratto A3 avvenuti tra il 2011 ed il 2023

Con la seguente distribuzione volumetrica (Figura 4.37), si nota che l'erosione ha comportato un prevalente cambio d'elevazione di circa -0.85 m , coinvolgendo una quantità di sedimento pari a circa 4013 m^3 . La deposizione, ha definito per lo più un cambio d'elevazione di circa 1.25 m , interessando un volume pari a 4125 m^3 .

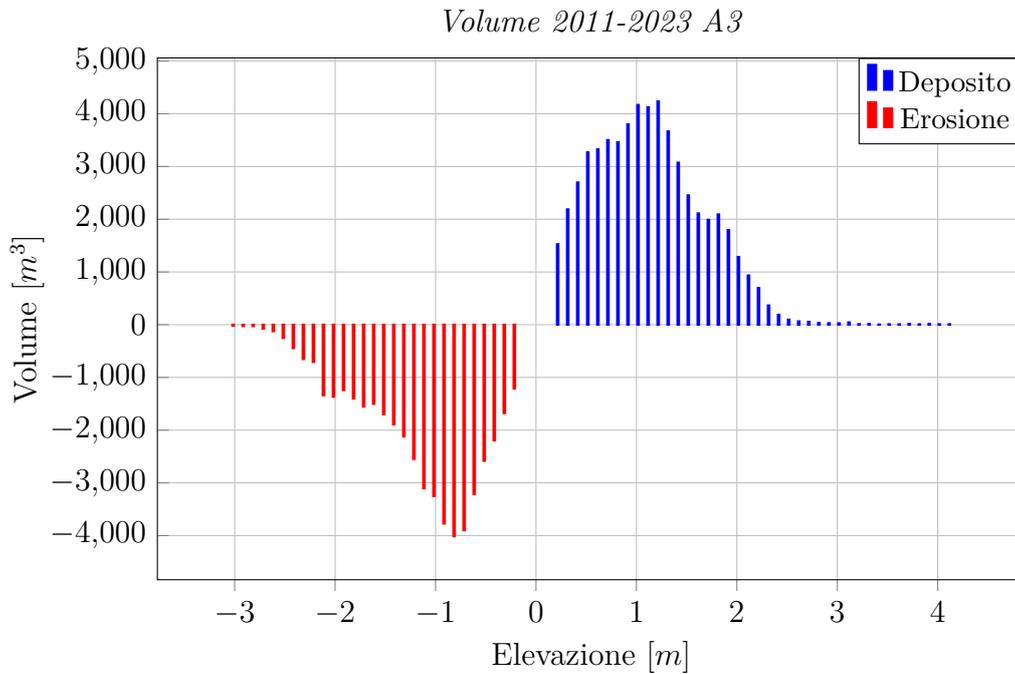


Figura 4.37: Variazione volumetrica per erosione e deposizione nel sottotratto A3

Considerando i risultati complessivi di volume eroso e depositato (Figura 4.38), si riscontra che l'erosione ha comportato una perdita di $47,913 \text{ m}^3 \pm 11,064 \text{ m}^3$ (23%) di materiale, mentre la deposizione ha registrato un aumento di sedimento pari a $57,396 \text{ m}^3 \pm 13,157 \text{ m}^3$ (23%). Il volume netto è pari a $9483 \text{ m}^3 \pm 17,191 \text{ m}^3$ (18%).

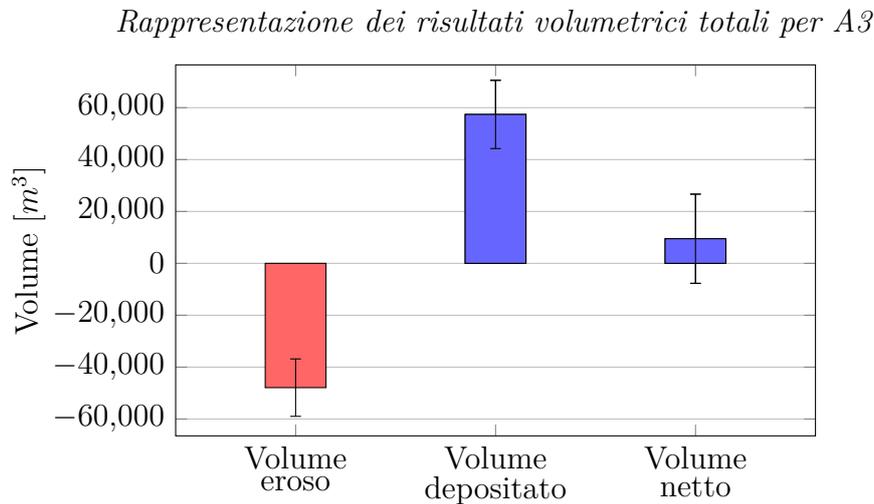


Figura 4.38: Variazione totale del volume tra il 2011 e 2023

Osservando i risultati areali per il sottotratto A3 (Figura 4.39), si riscontra che l'erosione prevalente ha comportato un cambio d'elevazione di circa -0.75 m , interessando una superficie di 5194 m^2 . Per quanto riguarda la deposizione, invece, la

variazione altimetrica è stata più bassa, pari a circa 0.25 m; tuttavia, si è verificata su una superficie maggiore, pari a circa 6264 m².

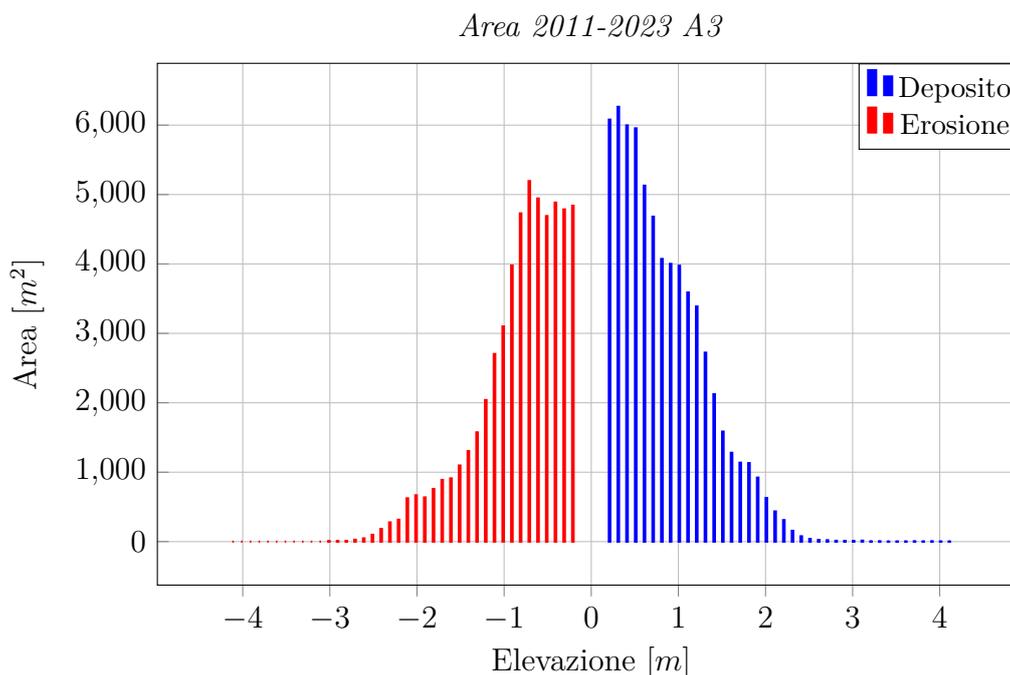


Figura 4.39: Variazione della superficie per erosione e deposizione nel sottotratto A3

Nel grafico seguente (Figura 4.40), viene evidenziata la maggior estensione della deposizione all'interno del sottotratto in esame, la quale è pari a 65,785 m². Inferiore invece, l'erosione, la quale ha interessato una superficie di circa 55,321 m².

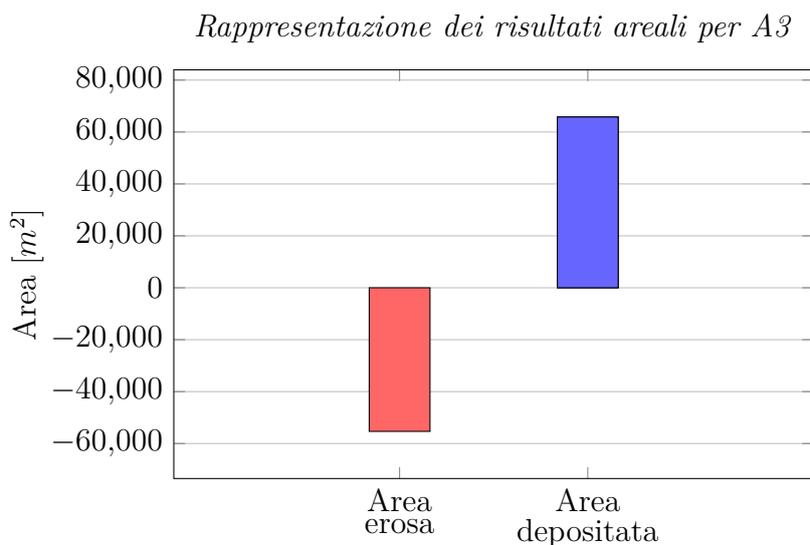


Figura 4.40: Variazione totale della superficie tra il 2011 e 2023

Dai fenomeni di erosione e deposizione ne conseguono variazioni verticali, a tal proposito all'interno del sottotratto A3, si è verificata una perdita di elevazione

media pari a $-0.87\text{ m} \pm 0.20\text{ m}$ (23%). In questo caso, risulta equivalente anche la deposizione, registrando gli stessi valori. Tuttavia, analizzando solamente le variazioni rilevabili, la colonna C mostra un guadagno di quota netto medio pari a $0.08\text{ m} \pm 0.14\text{ m}$ (181%).

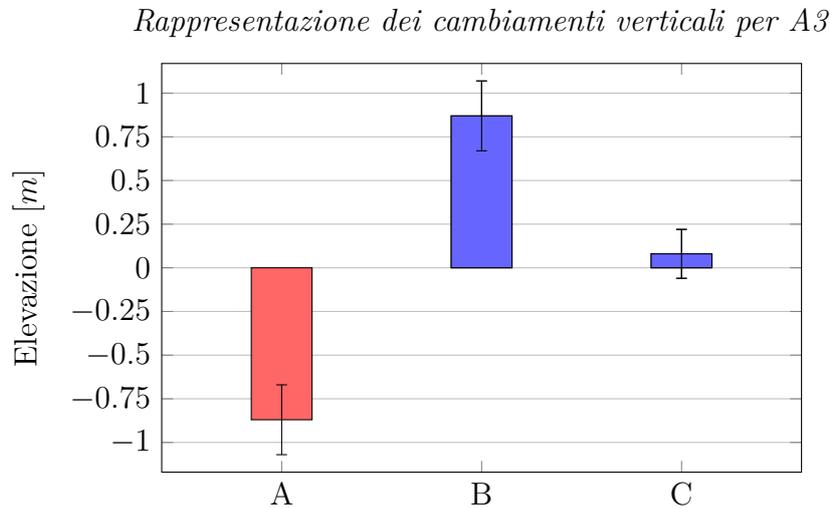


Figura 4.41: Quantificazione altimetrica delle variazioni tra il 2011 e 2023, A: Quota media erosa (m), B: Quota media depositata (m), C: Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili presenti in Tabella 4.3

Infine, analizzando le sezioni trasversali (Figura 4.42), si riscontra una forte variabilità tra i due periodi. La piana alluvionale di destra idrografica, che nel 2011 si estendeva per circa 130 m , nel 2023 ha subito una forte riduzione, di circa 100 m . La riduzione della piana alluvionale ha portato alla formazione, al suo termine, di un canale secondario, individuabile da un netto abbassamento di quota ad una distanza di circa 40 m nel 2023. Nel 2011 il canale principale lo si può osservare posizionato a circa 200 m , al suo termine si verifica un aumento di quota che vede la formazione di barre nude e vegetate, seguito da un ulteriore abbassamento a circa una distanza di 540 m , dove si individua un ulteriore canale secondario. Successivamente, si è registrato un aumento di quota che comporta la formazione di isole con vegetazione matura. Infine, si individua la presenza della piana alluvionale a circa 700 m . Considerando la sezione del 2023, il canale principale lo si vede estendersi da una distanza di 320 m fino a circa 440 m , con la presenza a circa 370 m di una barra nuda che comporta un aumento della quota. Nel tratto finale, in sinistra idrografica, come per il 2011 si ha un susseguirsi di barre vegetate e nude

dopo le quali si presenta un ulteriore canale secondario tra i 550 m ed i 570 m. Riguardo le isole, nel 2023 si ha un aumento della quota dovuto alla crescita della vegetazione fino ad una distanza di 700 m, dopo la quale si ha l'inizio della piana alluvionale di sinistra idrografica, che si è mantenuta inalterata rispetto al 2011.

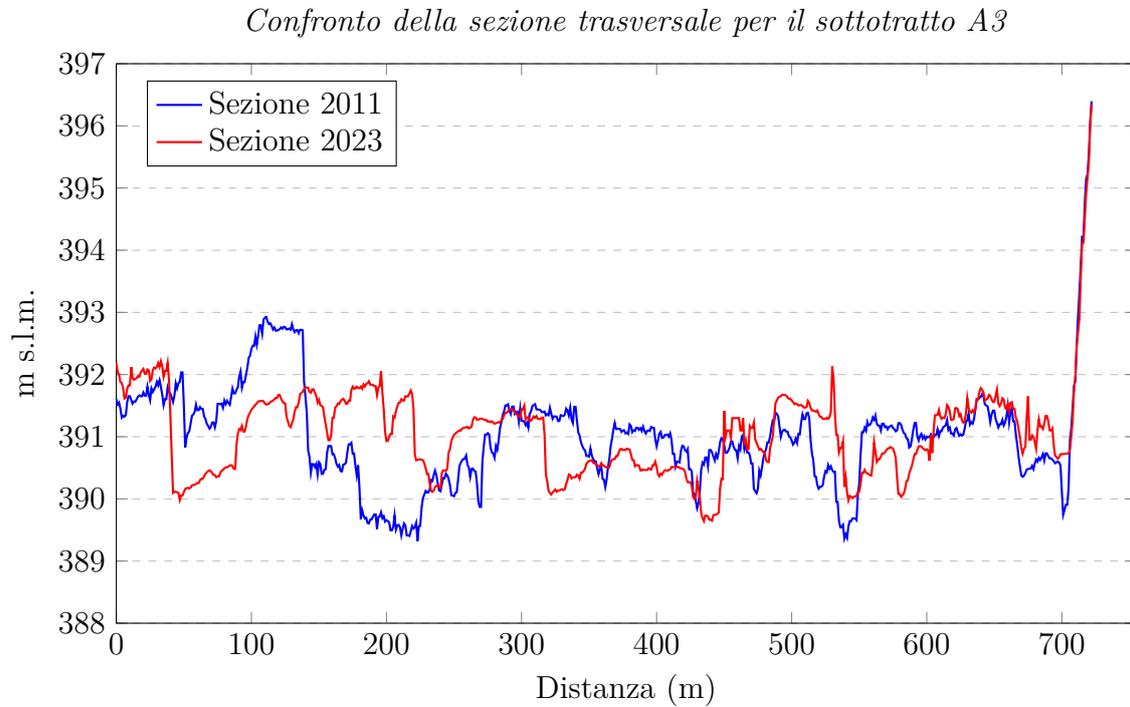


Figura 4.42: Confronto della variazione altimetrica 2011-2023 per il sottotratto A3, la destra idrografica corrisponde al valore 0 dell'asse "Distanza (m)"

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva (Tabella 4.6) dei risultati ottenuti mediante l'elaborazione con il software GCD.

Tabella 4.6: Tabella riassuntiva per il sottotratto A3 ottenuta mediante GCD

Parametri	Stima DoD:		
AREALI:			
Area totale erosa (m ²)	55,321		
Area totale depositata (m ²)	65,785		
Area totale con variazioni rilevabili (m ²)	121,106		
Area totale di interesse (m ²)	141,502		
Percentuale dell'area di interesse con variazioni rilevabili	86%		
VOLUMETRICI:			
		± Errore (m ³)	% Errore
Volume totale eroso (m ³)	47,913	11,064	23%
Volume totale depositato (m ³)	57,396	13,157	23%
Volume totale (m ³)	105,310	24,221	23%
Volume netto (m ³)	9,483	17,191	181%
CAMBIAMENTI VERTICALI:			
		± Errore (m)	% Errore
Quota media erosa (m)	0.87	0.20	23%
Quota media depositata (m)	0.87	0.20	23%
Variazione quota media netta (m) nell'area con variazioni rilevabili	0.08	0.14	181%
PERCENTUALI (DA VOLUME)			
Percentuale di erosione	45%		
Percentuale di deposito	55%		

Discussioni

Tra il 2011 ed il 2023, si sono susseguiti due eventi caratterizzati da un'elevata intensità; il primo nel novembre 2014 con una portata di $819 \text{ m}^3/\text{s}$ ed il secondo nell'ottobre 2018, in corrispondenza della tempesta Vaia che ha generato una portata di $1159 \text{ m}^3/\text{s}$. Gli eventi ai quali si fa riferimento nel presente studio sono stati caratterizzati da valori al di sopra della soglia della portata a piene rive (*over bank-full*), la quale, per il Fiume Piave è stata stimata da Comiti et al. (2011) pari a circa $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Stante la loro magnitudo, tali eventi hanno generato intensi fenomeni di erosione e deposizione favorendo una forte variabilità tra le unità morfologiche. Mediante le analisi condotte, sia fotointerpretative che morfologiche-topografiche, è stato possibile individuare ed evidenziare gli effetti delle portate nei tre sottotratti in esame. Oltre all'effetto della piena, è importante considerare l'influenza dell'impatto antropico. Infatti, come osservato da Sitzia et al. (2016), il Fiume Piave presenta un grado intermedio di disturbo antropico, dovuto alla costruzione di dighe, impianti idroelettrici ed all'estrazione di ghiaia. Un altro fattore che riveste un ruolo importante è la vegetazione, come studiato da Sitzia et al. (2016) e successivamente da Picco et al. (2023). La diversità morfologica è, infatti, altamente influenzata dalla presenza di vegetazione che, a sua volta, varia a seconda della configurazione morfologica. In merito a ciò, l'integrazione delle due tipologie di analisi ha permesso di comprendere quanto avvenuto. All'interno del sottotratto A1, si è verificato un forte aumento delle barre nude, tra il 2011 ed il 2015, questa variazione ha permesso negli anni successivi l'insediamento della vegetazione, visibile in primo luogo mediante

l'aumento dell'estensione delle barre vegetate e successivamente a seguito della loro stabilizzazione con un incremento della presenza di isole. Quanto osservato da ortofoto, lo si osserva anche dall'analisi morfologica-topografica, in quanto si è registrato un volume netto positivo di sedimento all'interno del sottotratto, il quale testimonia la prevalente deposizione nell'area considerata. Analizzando il canale bagnato, si nota una contrazione dell'unità a livello planimetrico, a causa della deposizione. Inoltre, osservando la sezione trasversale, non si verificano importanti variazioni della profondità del canale stesso. In particolare, il *thalweg* è quasi in equilibrio tra il 2011 ed il 2023. Al contrario, nel sottotratto A2, le analisi svolte mediante DoD hanno evidenziato, seppur ridotta, una tendenza all'erosione. Ciò è confermato anche dai risultati derivanti da fotointerpretazione, i quali hanno dimostrato una erosione parziale delle isole fluviali. Successivamente, tra il 2015 ed il 2023, si è verificata una forte crescita di vegetazione giovane, la quale ha permesso l'estensione delle barre vegetate. Questa dinamica rappresenta un punto molto importante, in quanto può portare in futuro ad un'affermazione della vegetazione ed alla diffusione delle isole all'interno del sottotratto. Tuttavia, saranno necessarie ulteriori analisi nel medio-lungo termine per verificare tale ipotesi. Per quanto riguarda il canale bagnato, dalle analisi fotointerpretative si è vista una tendenza all'unione dei diversi canali, comportando un allargamento del canale principale ed un decremento della profondità. Questa dinamica la si ritrova nello studio condotto da Comiti et al. (2011) in cui nel Piave si nota una correlazione tra allargamento del canale e deposizione. È possibile ipotizzare che l'unione dei diversi canali sia stata favorita dallo sviluppo della vegetazione in sinistra idrografica, che ha comportato la stabilizzazione della sponda ed un conseguente restringimento del canale attivo, come proposto da Picco et al. (2017). La crescita della vegetazione, la riduzione del canale attivo e la diminuzione di canali secondari all'interno del sottotratto favoriscono inoltre la transizione da una configurazione a canali intrecciati a pseudomeandriiforme (Comiti et al., 2011). In merito a queste variazioni è importante dire, come proposto da Piegay et al. (2009) e successivamente ripreso da Comiti et al. (2011), che i recenti cambiamenti possono essere considerati fluttuazioni nel breve periodo dovute ad eventi di piena,

piuttosto che aggiustamenti del canale nel lungo periodo. Nell'ultimo sottotratto in esame, A3, si sono verificate dinamiche differenti rispetto ai sottotratti precedenti. In particolare, i risultati del DoD, hanno evidenziato che si è verificata per lo più deposizione, osservabile anche dalle analisi fotointerpretative. Tuttavia, analizzando il sottotratto a scala locale, è possibile notare che è stato caratterizzato da un'erosione laterale localizzata, che ha comportato una forte perdita di superficie occupata dalla piana alluvionale posta in destra idrografica. Ad ogni modo, anche in questo sottotratto si è notata una dinamica comune ai precedenti, data dall'espansione, in quasi tutta la superficie considerata, dell'unità morfologica "barra vegetata", l'aumento di quest'ultima è stata probabilmente favorita dall'assenza di eventi di elevata intensità dopo Vaia. Questa nuova porzione vegetata necessiterà di molta attenzione in vista di dinamiche evolutive future, tra le quali la stabilizzazione e formazione di isole. Ciò comporterebbe importanti modifiche sul piano ecologico andando a formare nuovi habitat fluviali. Quest'ultima dinamica, è infatti, in accordo con quanto presentato da Sitzia et al. (2023), ovvero che lo sviluppo della vegetazione può influenzare in modo significativo la biodiversità fluviale e l'ambiente. Osservando le dinamiche di sviluppo delle isole all'interno dei tre sottotratti è possibile notare che quest'ultime sono sempre state precedute da fenomeni di deposizione. Infatti, come dimostrato da Picco et al. (2016), le isole presenti nel Fiume Piave derivano da processi come lo sviluppo della vegetazione e la deposizione superficiale piuttosto che dalla separazione con la piana alluvionale. Tuttavia, come riportato precedentemente, per monitorare lo sviluppo saranno necessari ulteriori studi in merito a questa tematica. Sarà, inoltre, importante definire la provenienza delle specie colonizzatrici. Come riportato da Picco et al. (2023), l'invasione da parte di vegetazione giovane in fiumi impattati dall'uomo è collegata all'ingresso di specie alloctone, che colonizzano rapidamente le ghiaie esposte. Complessivamente, oltre alle analisi svolte in riferimento alle singole unità morfologiche, nel corso degli anni è stata registrata una migrazione del canale attivo da sinistra a destra idrografica. Tale dinamica è stata accentuata dall'erosione laterale alla quale sono state soggette le piane alluvionali, da questo si può dedurre che il tratto in esame è dotato ancora di una certa mobilità laterale,

nonostante le pianure alluvionali in corsi d'acqua disturbati dalla pressione antropica presentino una persistenza geomorfica maggiore rispetto a fiumi meno impattati Sitzia et al. (2016). È possibile ipotizzare che questa variazione sia stata accentuata dall'evento Vaia, il cui disturbo ha alterato fortemente le normali dinamiche fluviali. Nonostante i risultati ottenuti abbiano descritto in maniera piuttosto dettagliata quanto avvenuto nel periodo di interesse dello studio, è importante definire e comprendere quelli che sono i limiti operativi correlati alle analisi svolte. Per quanto riguarda l'analisi fotointerpretativa, gli errori sono dovuti soprattutto ad una questione di comprensione dell'unità morfologica, in funzione della risoluzione dei dati utilizzati. La difficoltà viene evidenziata soprattutto quando si parla di vegetazione, ed è necessario stabilire il suo grado di maturità ed altezza, in modo da definire se quest'ultima va a formare una barra vegetata o, al contrario, un'isola. Anche l'analisi svolta con dati LiDAR presenta delle limitazioni, nonostante la tecnica di acquisizione permetta di ottenere dati di alta qualità. Le principali problematiche sono spesso legate alla presenza di vegetazione; infatti, come descritto da Pellegrini et al. (2021), la copertura delle chiome comporta un errore intrinseco legato all'interpretazione e alla digitalizzazione da parte dell'operatore. Inoltre, la produzione di un DTM di bassa qualità compromette la precisione di un'analisi DoD (Cavalli et al., 2017). Un'ulteriore problematica, connessa all'utilizzo del DoD, è rappresentata dalla difficoltà di quest'ultimo di descrivere piccole variazioni (Cavalli et al., 2017). Tuttavia, nel contesto della presente analisi, questa problematica è stata limitata in quanto il DoD è stato computato su una finestra temporale di 12 anni. Nell'affidabilità dei risultati, però, c'è da considerare la scelta del *minLOD*. Quest'ultimo viene usato per non considerare variazioni non reali, spesso la scelta del valore corrisponde all'errore associato alla produzione del DEM stesso (Cucchiario et al., 2024). Qualora questo valore non fosse scelto in maniera adeguata, come osservato da James et al. (2012), si potrebbero non considerare variazioni reali, portando così ad una sottovalutazione dei risultati ottenuti. Ad ogni modo, nonostante questo metodo possa essere soggetto ad alcuni errori, trova largo impiego per la comprensione delle variazioni fluviomorfologiche.

Conclusioni

Il Fiume Piave tra il 2011 ed il 2023 è stato soggetto a due eventi di piena intensi, il primo nel 2014 ed il secondo nel 2018. Entrambi questi episodi sono stati classificati come "*over bankfull*", definendo così valori di deflusso al di sopra dei regimi che caratterizzano la portata a piene rive. Questi eventi hanno, quindi, influenzato in modo evidente i fenomeni di deposizione ed erosione. Dalle analisi svolte e dai relativi risultati è stato possibile, individuare e comprendere le dinamiche che si sono susseguite, in relazione ad eventi di una certa intensità come quelli presi di riferimento nel presente caso di studio. Nel sottotratto A1 tra il 2011 ed il 2015 si è registrato un forte aumento delle barre nude, dovuto sia alla deposizione che all'eliminazione della vegetazione a seguito dell'evento del 2014. Questa dinamica si è poi invertita tra il 2015 ed il 2023, in quanto, come è stato analizzato, si è instaurata nuovamente e vigorosamente vegetazione sia giovane che matura. Quest'ultima ha permesso la creazione di diverse isole. Nel sottotratto A2, al contrario, si è riscontrata una tendenza all'erosione, in particolare tra il 2011 ed il 2015. Tuttavia, anche in questo caso, nel 2023 si è registrata la ricomparsa della vegetazione giovane. Infine, nel sottotratto A3, si sono susseguite delle dinamiche differenti, in particolare per la piana alluvionale. Quest'ultima è stata soggetta ad una forte erosione tra il 2015 ed il 2023, riconducibile all'intensità dell'evento Vaia. Tale dinamica ha contribuito a definire un allargamento del canale attivo verso la destra idrografica. Nel resto della superficie si è verificata, anche in quest'ultimo caso, una forte colonizzazione da parte della vegetazione, sia giovane che adulta. Come è possibile comprendere,

c'è stata una dinamica comune all'interno di tutti i sottotratti, con una marcata crescita della vegetazione in alveo, in particolare a seguito dell'evento Vaia. Vista questa forte espansione accentuata dalla permanenza di condizioni favorevoli, diventa necessario monitorare tali superfici, sia dal punto di vista dell'evoluzione futura della struttura che della composizione, così da individuare l'insediamento di eventuali specie invasive, tipiche di corsi d'acqua impattati. In conclusione, è possibile dire che le dinamiche che si susseguono sono molteplici ed ognuna presenta un grado di intensità e variabilità molto diverso, sia a scala spaziale che temporale. È importante ricordare che quest'ultime non vengono innescate solamente da un fattore, ma spesso derivano dalla combinazione di diversi agenti, come la portata, la vegetazione riparia o eventuali accumuli di legname presenti nel canale attivo e la disponibilità di sedimento veicolabile. In aggiunta a questi fattori interni al sistema fluviale ci sono ulteriori fattori da considerare, quali quelli relativi alla pressione antropica e ai cambiamenti climatici. La prima va ad alterare le normali dinamiche fluviali attraverso interventi diretti in alveo (sistemazioni con opere, estrazione di sedimenti), i cambiamenti climatici, invece, influenzano il generarsi degli eventi di piena, contribuendo ad una loro estremizzazione ed un aumento della frequenza di accadimento. In questo caso, non solo viene colpito il sistema fluviale, ma si trovano coinvolte anche tutte quelle attività commerciali, turistico e ricreative nonché abitazioni prossime ai corsi d'acqua stessi. Da queste considerazioni è possibile comprendere l'importanza e la necessità di effettuare monitoraggi sul territorio, quest'ultimi sono avvantaggiati dall'impiego e dalla diffusione di tecnologie sempre più avanzate, che permettono l'acquisizione di dati in modo accurato, riducendo gli errori che ne derivano. Così facendo si migliora la precisione delle analisi, rendendole di gran lunga più efficienti ed efficaci, riducendo di conseguenza le perdite economiche e soprattutto il rischio attraverso la comprensione del sistema fluviale.

Bibliografia

- Azzoni, Roberto Sergio, Manuela Pelfini e Andrea Zerboni (2023). «Estimating the Evolution of a Post-Little Ice Age Deglaciaded Alpine Valley through the DEM of Difference (DoD)». In: *Remote Sensing* 15.12, p. 3190.
- Billi, Paolo et al. (1994). «Morfologia dei corsi d'acqua». In: *Verde ambiente* 5, pp. 61–70.
- Cavalli, Marco, Beatrice Goldin, Francesco Comiti, Francesco Brardinoni e Lorenzo Marchi (2017). «Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models». In: *Geomorphology* 291, pp. 4–16.
- Comiti, F, M Da Canal, Nicola Surian, L Mao, Lorenzo Picco e MARIO ARISTIDE Lenzi (2011). «Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years». In: *Geomorphology* 125.1, pp. 147–159.
- Croneborg, Louise, Keiko Saito, Michel Matera, Don McKeown e Jan van Aardt (2020). «Digital elevation models: A guidance note on how digital elevation models are created and used-includes key definitions, sample terms of reference, and how best to plan a DEM-mission». In.
- Cucchiaro, Sara, Lorenzo Martini, Eleonora Maset, Giacomo Pellegrini, Maria Eliana Poli, Alberto Beinart, Federico Cazorzi e Lorenzo Picco (2024). «Multi-temporal analysis to support the management of torrent control structures». In: *Catena* 235, p. 107599.
- D'Agostino, Vincenzo (2023). *Design of sustainable and resilient measures against floods*. Tutela e riassetto del territorio.
- Fryirs, Kirstie A e Gary J Brierley (2012). *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*. John Wiley & Sons.

- Gautam, Astha e Naina Mehta (2015). «A review on remote sensing technique: concept and principles». In: *International Journal for Research in Emerging Science and Technology* 2.5, pp. 1–6.
- Hupp, Cliff R e WR Osterkamp (1996). «Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes». In: *Geomorphology* 14.4, pp. 277–295.
- James, L Allan, Michael E Hodgson, Subhajit Ghoshal e Mary Megison Latiolais (2012). «Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis». In: *Geomorphology* 137.1, pp. 181–198.
- Kellerhals, Rolf (1972). «Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta». In: *Alberta Cooperative Research Program in Highway and River Engineering*.
- Kellerhals, Rolf, Michael Church e Dale I Bray (1976). «Classification and analysis of river processes». In: *Journal of the Hydraulics Division* 102.7, pp. 813–829.
- Kondolf, G Mathias (1994). «Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining». In: *Landscape and Urban planning* 28.2-3, pp. 225–243.
- Lenzi, Mario A (2023). *Channel morphology, large wood and sediment fluxes in mountain rivers*. Tutela e riassetto del territorio.
- Lenzi, MARIO ARISTIDE, Vincenzo D’Agostino, Diego Sonda et al. (2000). «Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti». In.
- Leopold, L. B., M. G. Wolman e J. P. Miller (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco: Freeman.
- Leopold, Luna Bergere e M Gordon Wolman (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office.
- Liu, Xiaoye (2008). «Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues». In: *Progress in physical geography* 32.1, pp. 31–49.
- Masini, Nicola, Rosa Coluzzi e Rosa Lasaponara (2011). «On the airborne Lidar contribution in archaeology: from site identification to landscape investigation». In: *Laser scanning, theory and applications*. IntechOpen.

- Meza, Jhacson, Andres G Marrugo, Gabriel Ospina, Milton Guerrero e Lenny A Romero (2019). «A Structure-from-motion pipeline for generating digital elevation models for surface-runoff analysis». In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1247. 1. IOP Publishing, p. 012039.
- Newson, Malcolm David e David Sear (1993). *River Conservation, River Dynamics, River Maintenance: Contradictions?*.
- Pellegrini, Giacomo, Lorenzo Martini, Marco Cavalli, Riccardo Rainato, Antonio Cazorzi e Lorenzo Picco (2021). «The morphological response of the Tegnias alpine catchment (Northeast Italy) to a Large Infrequent Disturbance». In: *Science of the Total Environment* 770, p. 145209.
- Picco, L, G Pellegrini, A Iroumé, MA Lenzi e R Rainato (2023). «The role of in-channel vegetation in driving and controlling the geomorphic changes along a gravel-bed river». In: *Geomorphology* 437, p. 108803.
- Picco, Lorenzo, F Comiti, Luca Mao, Alessia Tonon e MARIO ARISTIDE Lenzi (2017). «Medium and short term riparian vegetation, island and channel evolution in response to human pressure in a regulated gravel bed river (Piave River, Italy)». In: *Catena* 149, pp. 760–769.
- Picco, Lorenzo, Tommaso Sitzia, Luca Mao, Francesco Comiti e Mario A Lenzi (2016). «Linking riparian woody communities and fluviomorphological characteristics in a regulated gravel-bed river (Piave River, Northern Italy)». In: *Ecohydrology* 9.1, pp. 101–112.
- Piegay, Herve, Adrien Alber, Louise Slater e Laurent Bourdin (2009). «Census and typology of braided rivers in the French Alps». In: *Aquatic Sciences* 71, pp. 371–388.
- Rainato, Riccardo, Lorenzo Picco, Luca Mao, Johnny Moretto e MARIO ARISTIDE Lenzi (2014). «The extent of partial transport in a disturbed gravel-bed braided river (Piave River, North-eastern Italy)». In: *Quaderni di Idronomia Montana*, 32 (1), pp. 265–276.

- Rinaldi, Massimo, Nicola Surian, Francesco Comiti, M Bussettini et al. (2014). «IDRAIM: Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua.» In.
- Roman, Anamaria e Tudor Ursu (2016). «Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks». In: *Landscape archaeology on the northern frontier of the roman empire at porolissum: an interdisciplinary research project. Cluj-Napoca: Mega Publishing House*, pp. 141–152.
- Rosgen, David L (1994). «A classification of natural rivers». In: *Catena* 22.3, pp. 169–199.
- Rosgen, David L (1996). «Applied river morphology». In.
- Schumm, S.A. (1977). *The Fluvial System*. New York: Wiley, p. 338.
- Seminara, Giovanni (2006). «Meanders». In: *Journal of fluid mechanics* 554, pp. 271–297.
- Sitzia, Tommaso, Simone Iacopino, Edoardo Alterio, Francesco Comiti, Nicola Surian, Luca Mao, Mario Aristide Lenzi, Thomas Campagnaro e Lorenzo Picco (2023). «Revisiting Vegetation Gradient Analysis and the Intermediate Disturbance Hypothesis for the Interpretation of Riverine Geomorphic Patterns». In: *Land* 12.2, p. 378.
- Sitzia, Tommaso, Lorenzo Picco, Diego Ravazzolo, F Comiti, Luca Mao e MARIO ARISTIDE Lenzi (2016). «Relationships between woody vegetation and geomorphological patterns in three gravel-bed rivers with different intensities of anthropogenic disturbance». In: *Advances in water resources* 93, pp. 193–204.
- Surian, Nicola (1999). «Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy». In: *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group* 24.12, pp. 1135–1151.
- Surian, Nicola, Massimo Rinaldi, Luisa Pellegrini et al. (2009). «Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive». In.
- Thorne, C. R., M. D. Newson e R. D. Hey (1997). *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. J. Wiley & Sons.

- Wheaton, Joseph M, James Brasington, Stephen E Darby, Alan Kasprak, David Sear e Damiá Vericat (2013). «Morphodynamic signatures of braiding mechanisms as expressed through change in sediment storage in a gravel-bed river». In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118.2, pp. 759–779.
- Wheaton, Joseph M, James Brasington, Stephen E Darby e David A Sear (2010). «Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets». In: *Earth surface processes and landforms: the journal of the British Geomorphological Research Group* 35.2, pp. 136–156.
- Williams, Richard (2012). «DEMs of difference». In: *Geomorphological Techniques* 2.3.2.
- Wolman, M Gordon e John P Miller (1960). «Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes». In: *The Journal of Geology* 68.1, pp. 54–74.