

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI TESAF**

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

## Interazione tra la morfodinamica fluviale e le opere di sistemazione idraulico-forestale

Relatore: Prof. **Lorenzo Picco**

Correlatore: Dr. **Lorenzo Martini**

Laureanda:

**Giorgia Chiarel**

Matricola n. 2028737

ANNO ACCADEMICO 2022-2023



# INDICE

RIASSUNTO.....	V
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUZIONE .....	9
1.1 Trasporto solido torrentizio .....	9
1.2 Debris flow: caratteristiche generali.....	10
1.3 Morfodinamica del sedimento.....	11
1.4 LiDAR.....	14
2 OBIETTIVI.....	16
3 MATERIALI E METODI .....	17
3.1 Aree di studio .....	17
3.1.1 Miozza.....	17
3.1.2 Agozza .....	20
3.2 Condizioni climatiche.....	22
3.3 Rilievo delle opere.....	23
3.4 Analisi DoD.....	26
3.4.1 Dati topografici .....	26
3.4.2 Valutazione dell'incertezza.....	29
3.4.3 Applicazione GCD e calcolo DoD.....	30
3.5 Tratti di studio .....	35
4 RISULTATI.....	36
4.1 Stato delle opere .....	36
4.1.1 Miozza.....	36
4.1.2 Agozza .....	37
4.2 Risultati analisi DoD .....	38
4.2.1 Miozza.....	38
4.2.2 Agozza .....	45
5 DISCUSSIONI .....	50
6 CONCLUSIONI .....	53
7 BIBLIOGRAFIA .....	55



## RIASSUNTO

Le opere di sistemazione idraulico-forestale costituiscono uno strumento per la regolazione delle dinamiche di sedimento all'interno di un bacino montano. In particolare, le opere trasversali, quali briglie e soglie di fondo, svolgono le funzioni di stabilizzazione del fondo del canale, consolidamento dei versanti laterali, e regolazione del trasporto solido torrentizio.

Per ottenere rilievi accurati dello stato dei bacini, e consentire un aggiornamento costante delle misure di prevenzione e protezione necessarie nella gestione del rischio idrogeologico, è opportuno utilizzare dati topografici ad elevato dettaglio (HRT). Quella LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è una tecnologia HRT dalla quale si possono ricavare modelli digitali del terreno (DEM) ad elevata risoluzione. In particolare, i DEM ad elevato dettaglio costituiscono uno strumento attraverso il quale, applicando le opportune metodologie, è possibile monitorare i flussi di sedimento in termini qualitativi e quantitativi.

L'obiettivo di questa tesi consiste nello sviluppare una metodologia che permette di monitorare la funzionalità delle opere di sistemazione idraulico-forestale, usando un approccio multi-scala e multi-temporale.

Per raggiungere tale scopo, sono state eseguite analisi multi-temporali tra gli anni 2009 e 2018, all'interno di due bacini montani, il Rio Miozza e Rio Agozza (Friuli Venezia Giulia). Tali bacini sono caratterizzati dalla presenza di una serie di opere idraulico-forestali lungo il reticolo idrografico principale, nonché dalla predisposizione a fenomeni di trasporto solido intenso e colate detritiche. I dati su stato, funzionalità e localizzazione attuale delle opere all'interno del bacino, sono stati raccolti e organizzati svolgendo opportune indagini di campo. Lo studio è stato condotto applicando la metodologia della Differenza tra DEM (DoD) a partire dai DEM degli anni 2009 e 2018 di entrambi i bacini. L'approccio DoD ha restituito l'analisi dei fenomeni di erosione e di deposizione lungo i torrenti, in termini quantitativi ( $m^3$  mobilizzati) e qualitativi (localizzazione dei processi prevalenti). Ciò ha permesso di valutare l'influenza delle opere trasversali sulle dinamiche del sedimento. Inoltre, grazie ai rilievi di campo, si è potuto valutare il loro attuale stato e la funzionalità idraulica.

I risultati hanno evidenziato una differenza di volume di sedimento netta di  $308670,31 \pm 128491,76 m^3$  per il bacino del Rio Miozza e di  $-10686,21 \pm 6298,07 m^3$  per il bacino del Rio Agozza. L'altezza media verticale sulla superficie, al netto, è pari a  $3,07 \pm 1,02 m$  per il bacino del Rio Miozza e a  $1,59 \pm 0,54 m$  per il bacino del Rio Agozza. Le sistemazioni idraulico-forestali del Rio Miozza presentano una tendenza al sovralluvionamento, riscontrato sia da analisi DoD sia da analisi di campo. Le opere

del Rio Agozza risultano funzionali ad eccezione di alcune dinamiche di dettaglio riguardanti la funzionalità delle soglie di fondo.

Questa metodologia combinata può, dunque, essere di supporto al monitoraggio dello stato di funzionamento delle opere di sistemazione e alla pianificazione degli interventi di manutenzione più idonei alla prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico.

## ABSTRACT

Channel control works are solutions to manage sediment dynamics in a mountain basin. In particular, transverse control works, such as check dams and bed sills, have the role of channel stabilization, slope consolidation, retention and regulation of torrential sediment transport.

In order to assess accurately the state of the basins, allowing a constant update of the prevention and protection measures required in flood risk management, it is advisable to use Highly Detailed Topographic data (HRT). LiDAR (Light Detection and Ranging) is an HRT technology with which high resolution digital terrain models (DEM) can be obtained. Notably, if robust methodology are defined, highly detailed DEMs can constitute a tool for carrying out qualitative and quantitative sediment flow monitoring operations.

The main aim of this thesis is to develop a methodology to monitor the functionality of channel control works, using a multi-scale and multi-temporal approach.

To achieve this aim, multi-temporal analyses were carried out between the years 2009 and 2018, within two mountain basins, the Rio Miozza and Rio Agozza (Friuli Venezia Giulia). These basins are characterized by the presence of a series of control works along the main channel because of their predisposition to intense solid transport and debris flows. Data related to the structural status, functionality and current location of the control works within the basin were first collected and organized during ad-hoc field surveys. The study was conducted by applying the Difference Between DEMs (DoD) methodology from the 2009 and 2018 DEMs of both basins. The DoD approach returned results of erosion and deposition along the streams, both in quantitative ( $\text{m}^3$  mobilised) and qualitative (location of prevailing processes) terms. This made possible the assessment of the influence of transverse works on sediment dynamics. Furthermore, thanks to the field surveys, it was possible to combine the information regarding their current hydraulic functionality.

The results returned a net sediment volume difference of  $308670,31 \pm 128491,76 \text{ m}^3$  for the Rio Miozza basin and  $-10686,21 \pm 6298,07 \text{ m}^3$  for the Rio Agozza basin. Moreover, the average net thickness of difference is  $3,07 \pm 1,02 \text{ m}$  for the Rio Miozza basin and  $1,59 \pm 0,54 \text{ m}$  for the Rio Agozza basin. Overall, the Rio Miozza control works show a tendency to overflowing, found by both DoD and field analyses. On the other hand, the channel control works of the Rio Agozza are functional except for some few specific cases concerning bed sills.

This combined methodology can, therefore, support the monitoring of the functionality of the channel control works and the planning of the most suitable maintenance interventions for the prevention and mitigation of hydrogeological risk.



# 1 INTRODUZIONE

La Direttiva Alluvioni 2007/60/CE, recepita in Italia con il Decreto Legislativo del 23 febbraio 2010 n. 49 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione del rischio alluvioni”, prevede la predisposizione di un piano di gestione del rischio alluvioni con particolare riferimento alle misure di protezione primaria. Tali misure si suddividono nelle tre principali ovvero: (i) Prevenzione: riguardante le politiche del territorio, le regole urbanistiche e le azioni di monitoraggio e di ripristino; (ii) Preparazione: riguardante i modelli di previsione e di allerta, i protocolli di gestione delle opere di difesa, azioni e piani di protezione civile; (iii) Protezione: in riferimento alle opere idrauliche e idraulico-forestali, alla manutenzione e gestione dei corsi d’acqua, e interventi di riqualificazione. (D’Agostino, 2021).

Le opere idraulico-forestali e il monitoraggio di stato e funzionalità sono dunque tra i punti chiave ai fini della gestione del rischio idrogeologico.

L’erosione del letto e delle sponde dei corsi d’acqua montani è causa di destabilizzazione lungo il canale. Le opere che contrastano tale destabilizzazione possono essere di tipo trasversale o longitudinale in base al processo da contrastare e al grado di destabilizzazione. Le opere di tipo trasversale mitigano i processi che riguardano l’erosione dell’alveo riducendo la pendenza del canale, mentre le opere longitudinali l’erosione spondale (Huebl, 2005).

Le sistemazioni idrauliche e idraulico-forestali sono dunque necessarie alla protezione da processi di tipo alluvionale in quanto rappresentano un grave pericolo per gli insediamenti urbani (Cavalli& Marchi, 2008). La progettazione di interventi di sistemazione idraulico-forestale si basa sullo studio dei processi che si verificano all’interno del bacino ai fini dell’esecuzione di un intervento mirato.

## 1.1 Trasporto solido torrentizio

Convenzionalmente, per la maggior parte dei bacini montani, si distinguono tre zone principali differenziate per caratteristiche e per i processi che vi si verificano. Da monte verso valle si individua il bacino di alimentazione, il canale principale e il conoide di deiezione.

Il bacino di alimentazione è la zona sorgente di sedimento, da cui proviene la gran parte del materiale solido, il quale viene trasportato verso valle attraverso il canale di scorrimento fino al punto in cui, in corrispondenza di una diminuzione della pendenza, il materiale assume un angolo di deposizione con la formazione del conoide di deiezione.

Le correnti idriche, in funzione della velocità e in base alle caratteristiche di turbolenza, sono in grado di trasportare materiale solido di diversa granulometria dando origine al processo gravitativo del trasporto solido (Dalla Fontana, 2014). Il trasporto solido è dunque il processo del movimento da monte verso valle di materiale, ovvero, il collegamento tra le zone sorgenti di sedimento e le zone di deposizione.

La variabile principale che discrimina le tipologie di forme di trasporto è la concentrazione solido-volumetrica ( $C_v$ ) espressa come la percentuale di materiali solidi nel volume. Secondo la classificazione proposta da Aulitzky (1973, 1982) le tipologie di trasporto solido possono suddividersi in quattro categorie:

- Trasporto in Sospensione: la mobilizzazione riguarda sedimenti a granulometria fine come sabbia, limo e argilla;
- Trasporto di Fondo: il moto dei sedimenti verso valle avviene per: rotolamento, strisciamento e saltellamento sul fondo dell'alveo con concentrazione volumetrica inferiore al 15 o 20%;
- Correnti Iperconcentrate: sono flussi d'acqua molto rapidi pesantemente caricati di detriti (Hungar et al., 2014) che presentano una concentrazione volumetrica variabile tra il 20 e il 40%.
- Colate Detritiche: Flusso rapido o estremamente rapido saturo di detriti (Hungar et al., 2014) con concentrazione volumetrica da 25 a 70%.

La velocità di movimento è decrescente verso concentrazioni volumetriche maggiori.

## **1.2 Debris flow: caratteristiche generali**

Le colate detritiche sono flussi costituiti da acqua e materiale solido la cui concentrazione volumetrica dei sedimenti comporta ad un aumento di viscosità di diversi ordini di grandezza più elevata di quella dell'acqua (D'Agostino, 2021) . Una colata è un flusso continuo costituito da una miscela di sedimento e acqua guidato dalla gravità, il quale, grazie alla saturazione dei vuoti da parte di acqua e fango è in grado di raggiungere elevata mobilità (Takahashi, 2007).

Le condizioni necessarie per il verificarsi di un innesco di colata detritica sono:

- pendenza accentuata; -piogge ad elevata intensità; -disponibilità di sedimento mobilizzabile.

Un fenomeno di colata detritica può essere classificato secondo cause esogene di innesco (relative alle cause esterne al sistema: scroscio di pioggia, piogge intense in concomitanza con lo scioglimento

nivale, collasso di invasi d'acqua (fenomeno del *dam break*), terremoti, eruzioni vulcaniche); secondo le situazioni geomorfologiche ed idrauliche della fase di innesco e secondo le caratteristiche del mezzo e del fluido (reologia) (D'Agostino, 2021).

Dal punto di vista geomorfologico, le pendenze necessarie per lo scorrimento delle colate detritiche variano dai 3° ai 20°. I gradienti effettivi sono specifici per le tre zone (innesco, scorrimento e accumulo) e dipendono da numerosi fattori: il confinamento dell'alveo, la tipologia di detriti trasportati e il rapporto tra il sedimento e l'acqua. L'innesco generalmente si verifica in canali con pendenza superiore a 25° (47%); il trasporto e l'erosione una pendenza superiore a 15° (27%); la deposizione in conoide con una pendenza generalmente inferiore a 10° (15%) (Van Dine, 1996).

La velocità di una colata varia da 1 m/s a 20 m/s (Major, 1996) e dipende dalla pendenza del canale, dalle caratteristiche reologiche e dalla concentrazione volumetrica.

La disponibilità di sedimento in termini volumetrici in ogni bacino è una delle variabili da esaminare ai fini della progettazione di opere di sistemazione idraulica.

### **1.3 Morfodinamica del sedimento**

Il sistema fluviale e torrentizio svolge un ruolo chiave nel trasporto dei sedimenti dai versanti dei bacini alle zone alluvionali. Tuttavia, non tutto il volume di sedimento reso disponibile dai versanti attivi del bacino è ugualmente quantificabile alla sezione di chiusura (Fryirs, 2012). Dove il gradiente di pendenza diminuisce, si verificano deposizioni temporanee e permanenti di sedimento che possono essere localizzate sul versante, alla base del versante, in corrispondenza di una piana alluvionale o nel canale stesso (Walling, 1983).

I flussi di sedimento nei bacini sono governati dal modo in cui viene depositato e rimesso in movimento (Phillips, 2003), si parla dunque di connettività e disconnettività.

Fryirs (2012) definisce tre tipi di collegamento: longitudinale, laterale e verticale i quali possono essere interrotti da buffer, barriere and blankets. Questi "blocchi" accumulano materiale proveniente dal flusso principale e sono considerati il principale fattore che crea disconnettività all'interno del bacino. Il trasferimento del materiale da monte a valle e tra tributario e canale principale è definito come collegamento longitudinale, diverso da quello laterale che considera la relazione tra versante e canale principale (frequenza con cui il materiale proveniente da monte viene "ritrasferito") e tra il canale e la piana alluvionale (eventi guidati dalla magnitudo e dalla frequenza delle inondazioni che

portano ad un apporto o ad una rimozione del materiale nella piana); il collegamento verticale riguarda la coesione del materiale che costituisce le sponde del canale e dal regime di trasporto del canale.

Durante gli eventi di piena, il trasporto dei sedimenti diventa un fattore responsabile di pericolose e costose conseguenze sugli elementi esposti (Meunier, 1991). Gli interventi umani sono dunque finalizzati alla costruzione di opere per ridurre gli effetti negativi del rilascio di sedimenti (Piton et al., 2017) e per il controllo dell'erosione.

Le funzioni idrologiche, geomorfologiche e gli affetti ecologici delle briglie sono riportati nello studio di (Lucas-Borja et al., 2021). Per quanto concerne gli effetti idrologici, le briglie svolgono le funzioni di controllo del deflusso, riducendo la portata al picco, e di protezione dalle inondazioni delle aree situate a valle (Fortugno et al., 2017) creando disconnettività idrologica e sedimentologica (Marchi et al., 2019) La funzione geomorfologica è esplicitata attraverso la ritenzione dei sedimenti, la stabilizzazione del canale e dei versanti. La capacità di ritenzione dei sedimenti diminuisce nel corso del tempo (Zema et al., 2014; 2018) e dipende dalla volumetria specifica immagazzinabile per ogni opera. La stabilizzazione del canale mira a ridurre l'erosione dell'alveo e la stabilizzazione dei versanti consiste nell'innalzamento del letto dell'alveo per consolidare i processi erosivi. Numerosi sono anche gli effetti collaterali dovuti alla presenza delle briglie. Le briglie possono generare anche effetti negativi; tra cui l'erosione ai piedi della briglia determinata dalla dissipazione dell'energia dell'acqua in caduta libera (Lenzi & Comiti, 2003), la sifonatura, l'erosione e l'allargamento dei canali comportando, nel tempo, alla destabilizzazione dell'opera.

Piton et al. (2017) definiscono le briglie come principali opere per il controllo dei torrenti, le quali possono svolgere funzioni di stabilizzazione (funzione primaria), consolidamento, di riduzione del gradiente di pendenza, di ritenzione e di regolazione dei trasporti solidi.

- Briglie di stabilizzazione: mirano a ridurre l'incisione del letto dell'alveo e delle sponde e a centralizzare il flusso del corso d'acqua per ridurre l'erosione spondale ed evitare avulsioni;
- Briglie di consolidamento: costruite nel caso in cui, all'interno del bacino, si verifichi un'erosione localizzata (ad esempio una frana attiva) che può aumentare il volume di sedimenti nel flusso verso valle. La loro funzione è di elevare l'alveo consolidando il versante;
- Briglie per la riduzione della pendenza del canale: si localizzano dove la pendenza eccessiva dell'alveo crea delle condizioni di non equilibrio nel flusso di sedimenti; la loro funzione mira alla riduzione dell'energia del corso d'acqua riducendo di conseguenza la capacità di trasporto di materiale solido;

- Briglie di ritenzione: si tratta di una o più briglie costruite in serie la cui funzione principale è trattenere sedimenti nel lungo periodo. Questo blocco del flusso crea una serie di conseguenze a valle. Tale tipologia, dunque, è stata sostituita da opere con sistema di garantendo la continuità nel flusso di sedimenti;
- Briglie per la regolazione del trasporto solido.

La dimensione dei sedimenti trasportati dal corso d'acqua e la deposizione in termini di volume di sedimento alla base della briglia varia nel corso del tempo. Le cause sono principalmente legate alla magnitudo e alla durata dell'evento (Fryirs, 2012).

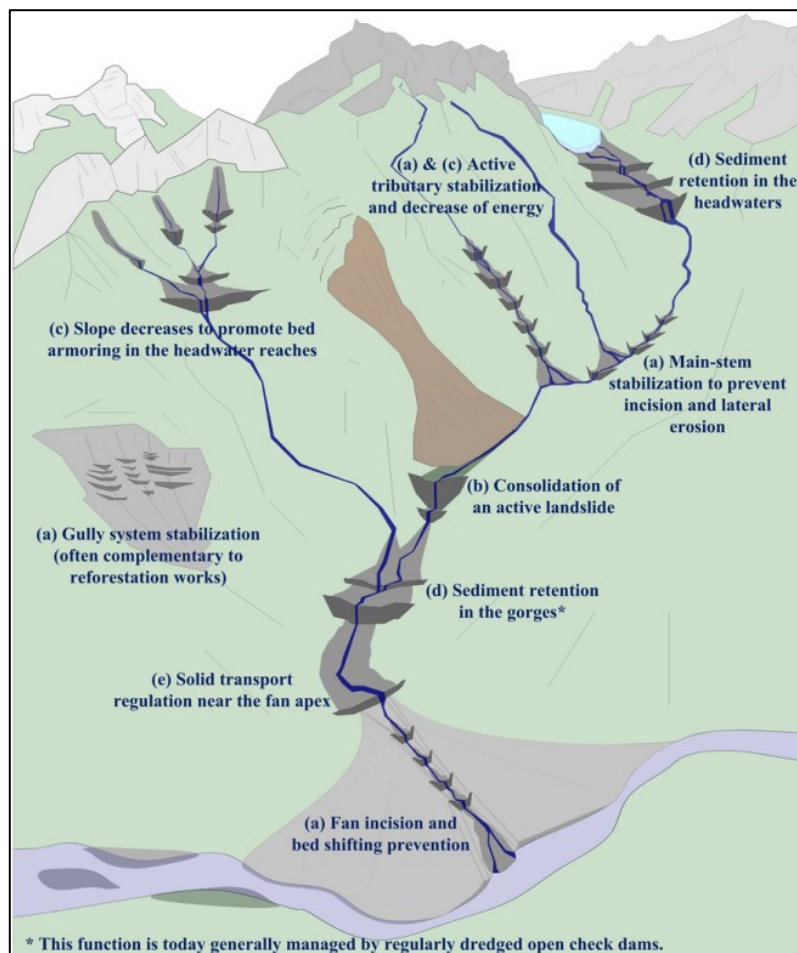


Fig. 1 Tipologie di briglie secondo funzione e struttura; a) stabilizzazione; b) consolidamento; c) riduzione della pendenza; d) ritenzione; e) regolazione del trasporto solido (Piton et al., 2017).

La creazione di opere trasversali modifica il naturale flusso di sedimenti, disaccoppiando la zona a monte dell'opera, dove generalmente il sedimento viene deposto, da quella a valle dove si verifica erosione (Piton & Recking, 2017). La capacità di una briglia di immagazzinare sedimento diminuisce nel corso del tempo (Lucas-Borja et al., 2021; Zema et al., 2014; 2018).

La suscettibilità di una singola opera può compromettere l'intero sistema, di conseguenza, è necessario un monitoraggio costante di stato e funzionalità delle sistemazioni idraulico forestali, aggiornando i modelli di rischio e pericolo, per attuare strategie di protezione opportune (Mazzorana et al., 2014).

A tal fine, la disponibilità di dati topografici ad elevato dettaglio (HRT) è un requisito fondamentale per la corretta gestione dei bacini montani (Sofia et al., 2012).

Lo sviluppo della tecnologia LiDAR permette di ottenere dati topografici 3D a larga scala con una risoluzione spaziale inferiore al metro (Slatton et al., 2007).

## 1.4 LiDAR

La tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è un sensore Laser in grado di misurare le distanze tra un target e il sensore misurando il tempo tra l'emissione e il ritorno dell'impulso. Il laser è un impulso luminoso, il quale viene riflesso e diffuso dagli oggetti di interesse (Liu, 2008). Un LiDAR può eseguire il rilievo da terra oppure può essere installato su un elicottero, aereo o drone. Un sistema LiDAR aerotrasportato è composto da: distanziometro laser, da un'unità di misura inerziale (IMU) e da un sistema di posizionamento globale (GPS) (Polat & Uysal, 2015). Le misure vengono effettuate lungo la traiettoria del velivolo e quelle rilevate in corrispondenza della parte centrale della traiettoria presentano un maggior livello di accuratezza (Charlton et al., 2003).

Il rilievo Lidar restituisce le coordinate x, y, e z di ogni misura, conoscendo la posizione, l'assetto del velivolo e la distanza sensore e punto rilevato è possibile eseguire il calcolo delle coordinate (Cavalli & Tarolli, 2011). Un rilievo LiDAR restituirà dunque una nuvola di punti che contiene le informazioni geografiche di ogni oggetto riflettente rilevato.

L'impronta laser a terra non è sempre costante ma la dimensione varia da 0.1 a 2 m proporzionalmente dall'altitudine e all'apertura angolare del sensore con la possibilità di generare multiple riflessioni. La caratteristica delle riflessioni multiple aumenta la probabilità che un impulso laser raggiunga il suolo anche in zone boscate. Un impulso può arrivare al ricevitore in due tempi diversi consentendo di discriminare il punto appartenente al terreno (tempi di ritorno maggiori; ultimo ritorno) dal punto appartenente al primo oggetto incontrato (tempi di ritorno minori, primo ritorno). Ad esempio, in una zona boscata il primo ritorno laser verrà riflesso dalla chioma di un albero e registrato in tempi minori mentre il secondo ritorno, registrato in tempi maggiori, individuerà la quota del terreno (Cavalli & Tarolli, 2011).

I dati LiDAR sono importanti per la restituzione di dati topografici ad alta risoluzione (*High-Resolution Topography*; HRT) che contribuiscono in modo significativo alla rappresentazione della superficie terrestre (Cavalli et al., 2008). I prodotti ricavabili da una nuvola di punti sono un modello digitale della superficie (*Digital Surface Model*; DSM) e un modello digitale del terreno (*Digital Terrain Model*; DTM). Utilizzando opportuni algoritmi di filtraggio e una successiva interpolazione per ricavare il DTM, i punti di soprassuolo (vegetazione, edifici etc.) vengono rimossi. Questa operazione di filtraggio è essenziale per ottenere un DTM ad elevato grado di accuratezza (Polat & Uysal, 2015).

Dalle elaborazioni di rilievi LiDAR multi-temporali è possibile ottenere sequenze di DTMs e differenze di DTMs (*DTM of Difference*; DODs) per quantificare la mobilizzazione dei sedimenti e le dinamiche di deposizione ed erosione nel corso del tempo (Cucchiario et al., 2019).

Ad esempio, Victoriano et al., 2018, ha valutato l'influenza delle briglie flessibili di ritenzione sulle dinamiche erosive e deposizionali all'interno de bacino Portainé sui Pirenei spagnoli mediante l'utilizzo della tecnologia LiDAR per un periodo di 7 anni.

Altro studio recente di Cucchiario et al. (2019) utilizza dati LiDAR multi-temporali per ottenere DTMs ad alta risoluzione ed effettuare analisi DoD analizzando il ruolo delle opere di sistemazione trasversale nelle dinamiche del bacino da colata Moscardo situato nelle alpi orientali.

## **2 OBIETTIVI**

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi consiste nel valutare il funzionamento delle sistemazioni idraulico-forestali e del loro ruolo nelle dinamiche del sedimento all'interno di due bacini montani (Rio Agozza e Miozza), localizzati nelle alpi orientali italiane (provincia di Udine, Friuli Venezia Giulia). Per raggiungere tale obiettivo, si sono combinati rilievi di campo con analisi DoD a partire da DEM ottenuti da dati LiDAR. In tal senso si è quantificato il volume di sedimento mobilitato, l'evoluzione temporale dei processi erosivi e deposizionali, nonché l'interazione dei flussi con le opere di sistemazione idraulico forestali all'interno dei due bacini montani.



### 3 MATERIALI E METODI

#### 3.1 Aree di studio

I bacini dei torrenti Miozza e Agozza sono localizzati nella regione alpina della Carnia, territorio montuoso situato a nord-ovest della provincia di Udine, Friuli Venezia Giulia (Fig. 2).

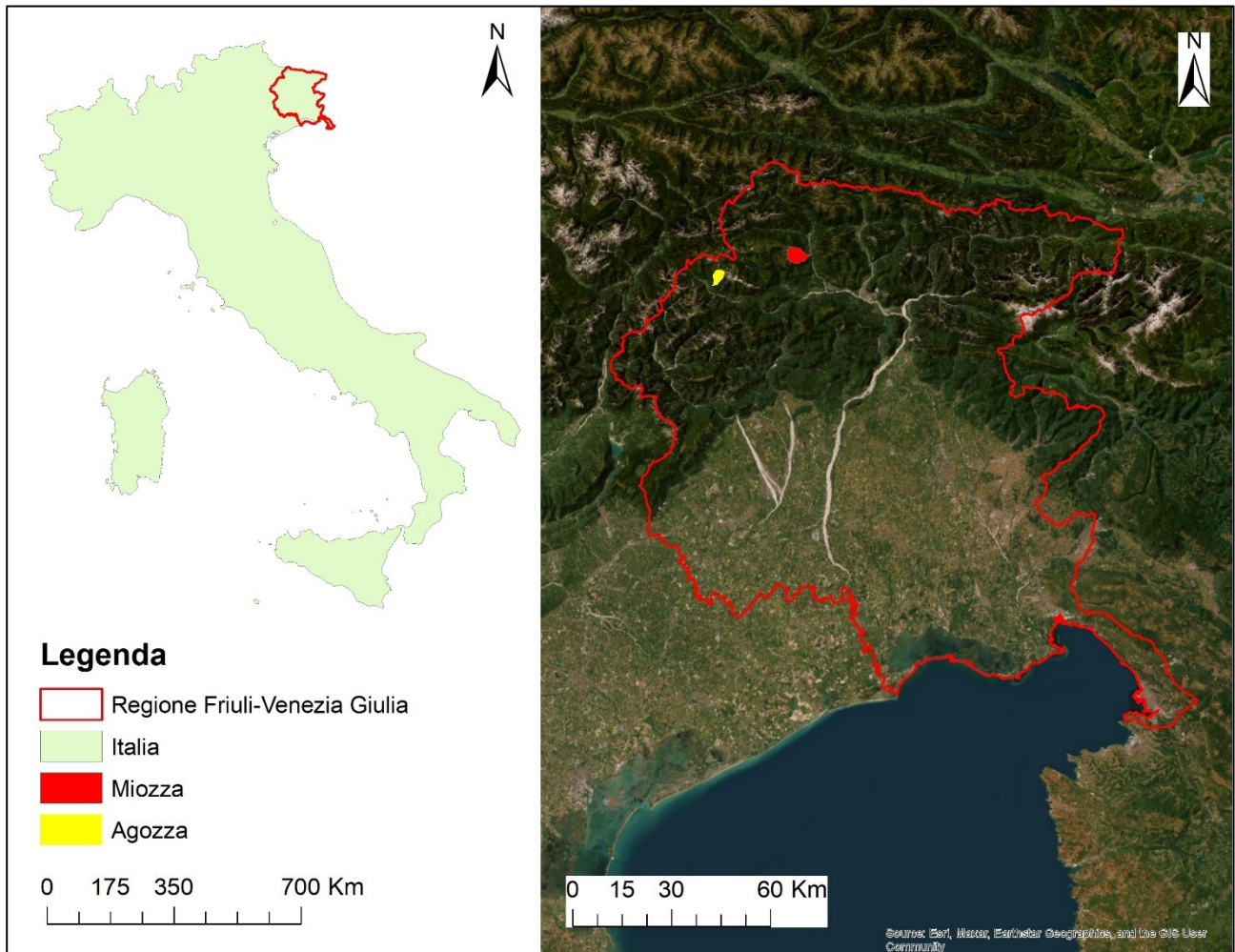


Fig. 2 Inquadramento generale.

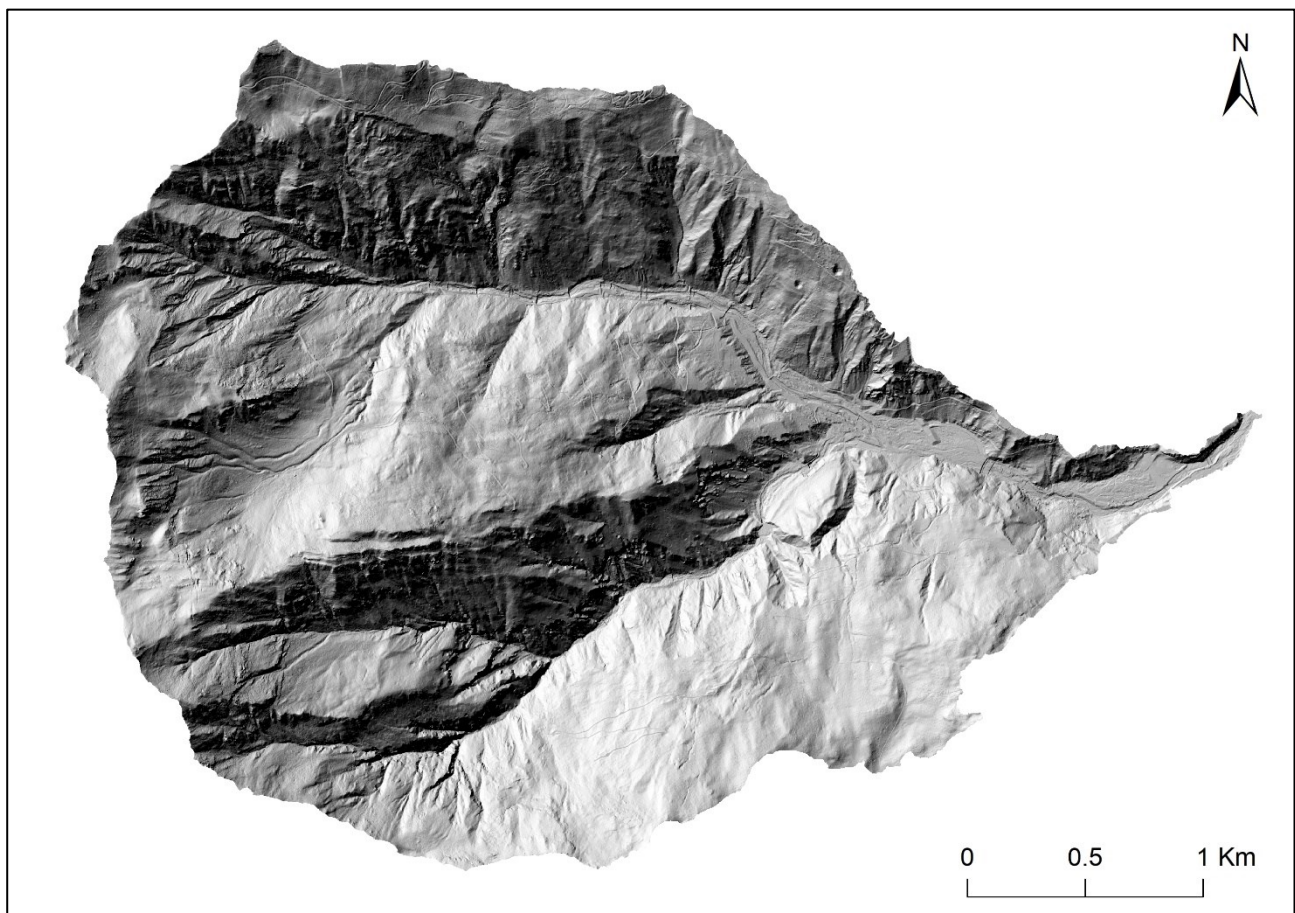
##### 3.1.1 Miozza

Il bacino del Rio Miozza (Fig. 3) è situato presso il comune di Ovaro e per una piccola parte nel comune di Raveo. È delimitato dal Monte Forchia a sud-est e dal Col Gentile a nord-est. Il torrente Miozza è un affluente in destra del torrente Degano che a sua volta confluisce nel fiume Tagliamento. Il bacino ha estensione pari a 10,5 Km<sup>2</sup>. In corrispondenza del punto di immissione nel torrente Degano, la quota minima è pari a 520 m s.l.m. mentre la quota massima è 2075 m s.l.m. in

corrispondenza del Col Gentile. A quota 668 m s.l.m. il Rio d'Archia, (affluente di destra) confluisce nel torrente Miozza (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005). La tabella 1 riporta le principali caratteristiche morfometriche del bacino.

*Tabella 1 Caratteristiche morfometriche del bacino del torrente Miozza.*

Quota minima m s.l.m.	520
Quota massima m s.l.m.	2075
Quota media m s.l.m.	1294
Pendenza massima (°)	85,8
Pendenza media (°)	33,8
Area del bacino (Km <sup>2</sup> )	10,5
Lunghezza asta fluviale principale (Km)	3,9
Sezione di chiusura scelta	Immissione nel torrente Degano.
Coordinate della sezione di chiusura UTM 33N EPSG:7792	336294.582829 5149148.119349



*Fig. 3 Bacino del torrente Miozza; modello digitale del terreno (DTM).*

Alla testata del bacino, a quota 1160 m s.l.m., si riconosce una nicchia di distacco di una paleofrana (Fig. 4A). L'area in questione è sorgente di sedimenti mobilizzati verso valle mediante fenomeni di

trasporto solido e colate detritiche (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005). L'attitudine del bacino alla formazione di colate detritiche è riconoscibile anche dalla presenza di depositi lobati alle quote medio-basse.

La testata del bacino è caratterizzata, inoltre, da numerosi tributari laterali a pendenza molto elevata che danno origine ad ampi coni detritici in corrispondenza della confluenza con l'asta principale (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005). Inoltre, sono presenti fenomeni di dissesto sui versanti lungo l'asta principale (Fig. 4B).

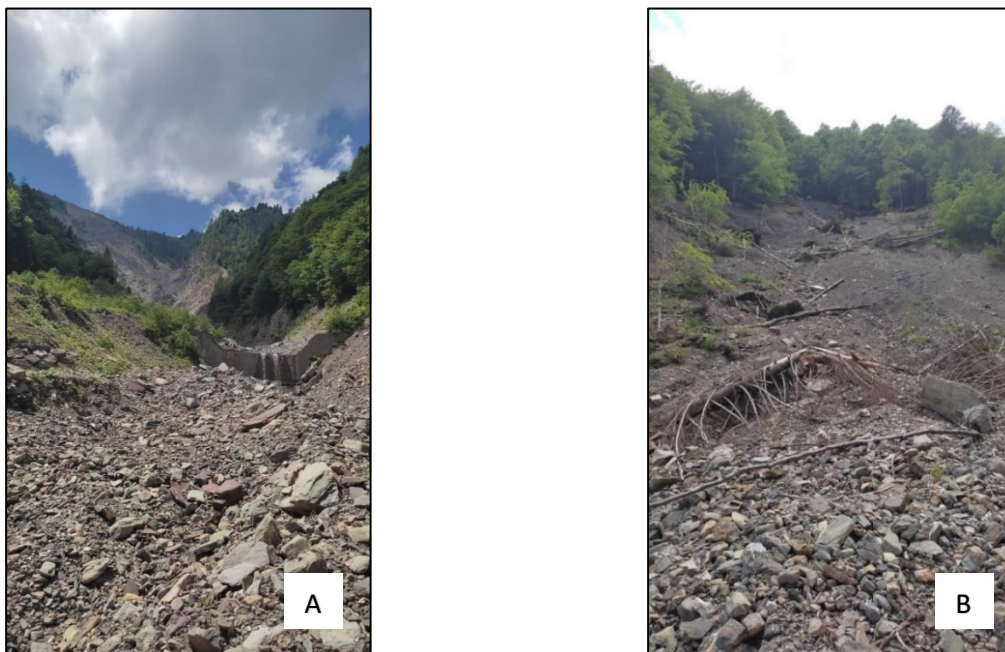


Fig. 4 A) Testata del bacino; visibile la zona di distacco della paleofrana; B) Zona di distacco di una frana in destra idrografica.

Il substrato è costituito prevalentemente da rocce di origine terrigena. Nella parte medio-alta del bacino, affiora principalmente la formazione di Werfen, composta da calcari, calcari marnosi, areniti e peliti. La zona di conoide a sud di Agrons, presenta affioramenti della formazione Val Degano, la cui facies a calcari scuri è alternata a marne calcaree. Il contrafforte che delimita il conoide è costituito dalla formazione di Dürrenstein formata da calcari, dolomie ed areniti violette (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005).

Circa il 40% della superficie del bacino è ricoperta da una coltre eluvio-colluviale formata da depositi morenici di fondo e detriti sciolti; tale condizione predispone all'insorgere di fenomeni franosi superficiali. (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005)

Il Rio d'Archia non presenta notevoli fenomeni di mobilizzazione di sedimento, ad eccezione di alcune aree in erosione e frana in destra orografica. L'alveo del torrente è caratterizzato da tratti stabili a sequenze di *step-pool* (Montgomery, D.R. & John M. Buffington, J.M. 1997).

### 3.1.2 Agozza

Il bacino del Rio Agozza (Fig. 5), affluente in sinistra del fiume Tagliamento, è localizzato presso il comune di Forni di Sopra (UD). La superficie del bacino è pari a 5,8 km<sup>2</sup> con una quota massima di 2467 m s.l.m. in corrispondenza del Monte Clapsavon (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005). La quota minima alla sezione di chiusura scelta in corrispondenza del ponte di via Nazionale è pari a 1021,6 m s.l.m. La tabella 2 presenta le principali caratteristiche morfometriche del bacino.

Tabella 2 Caratteristiche morfometriche del bacino del torrente Agozza.

Quota minima m s.l.m.	1021,6
Quota massima m s.l.m.	2467
Quota media m s.l.m.	1721,7
Pendenza massima (°)	88,7
Pendenza media (°)	32,4
Area del bacino (Km <sup>2</sup> )	5,8
Lunghezza asta fluviale principale (Km)	4,7
Sezione di chiusura scelta	Ponte di “via Nazionale”
Coordinate della sezione di chiusura UTM 33N EPSG:7792	314768.975112 5142695.108054

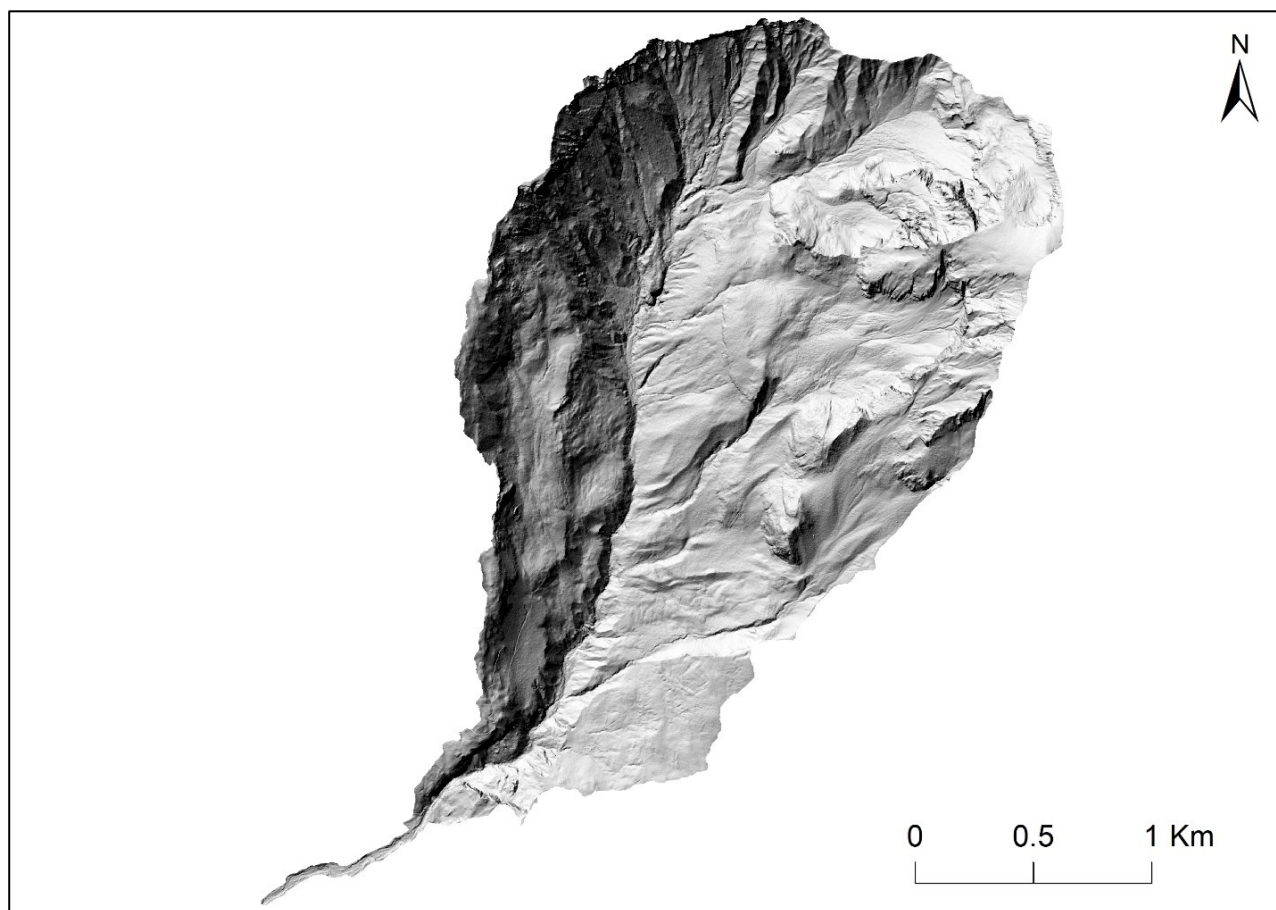


Fig. 5 Bacino del torrente Agozza; modello digitale del terreno (DTM).

Il bacino del Rio Agozza presenta numerose formazioni geologiche affioranti: in sinistra idrografica, verso la parte terminale del bacino, affiora Dolomia dello Sciliar formata da dolomie massicce e da calcari dolomitici grigio-scuri. In area di conoide e lungo l'alveo del Rio Agozza affiora la formazione di Dürrenstein. La copertura quaternaria formata da depositi glaciali, da depositi di versante, da depositi alluvionali e terrazzamenti è molto estesa (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005). Alla testata del bacino è presente una fascia di pascoli alpini sovrastati ad est dalle pareti calcaree del Monte Clapsavon e a ovest dalle pareti del Monte Lagna (2134 m s.l.m.). La testata a ovest apporta la maggiore quantità di materiale solido mobilizzato anche sottoforma di colata detritica e deposto a quota 1720 m s.l.m. in corrispondenza di una zona a minor pendenza (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005).

Il Rio Agozza è il collettore delle acque dei piccoli tributari che scorrono in condizioni di elevata pendenza e di substrato erodibile che sono responsabili di un importante contributo di trasporto dei sedimenti all'asta principale.

Il tratto successivo verso valle è caratterizzato da versanti ad elevata pendenza il cui substrato roccioso di origine vulcanica è piuttosto stabile. Le caratteristiche geomorfologiche dell'alveo (tratti stabili a *step-pool* (Montgomery, D.R. & John M. Buffington, J.M. 1997) la presenza di aree in erosione poco estese (minori di 100 m<sup>2</sup>) lungo questo tratto intermedio, non contribuiscono al trasporto di sedimento in grandi quantità.

In corrispondenza del punto a monte della località Fienili Duns a quota 1420 m s.l.m., si separa il tratto appena descritto dal restringimento dell'alveo che ora presenta ripide pareti rocciose. La geomorfologia dell'alveo, in questo tratto, è intervallata da tratti *step-pool* e tratti a *cascade* (Montgomery, D.R. & John M. Buffington, J.M. 1997) le sorgenti di sedimento sono poco estese e sono assenti zone di deposizione. I tratti a *cascade* sono di larghezza molto ridotta e altezza variabile da qualche metro fino a 20 metri (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005).

L'accentuato confinamento dell'alveo nel tratto terminale dell'asta (Fig.6A), e la presenza di massi ciclopici al suo interno, contribuiscono al verificarsi di fenomeni di *dam-break*, i quali causano fenomeni di trasporto solido intenso e colate detritiche

Il tratto terminale prima della sezione di chiusura scelta presso il Ponte di Via Nazionale è stato interessato da una sistemazione idraulico-forestale che ha previsto: la costruzione di scogliere in pietrame di grosse dimensioni intasate con calcestruzzo e terreno (Fig. 6B), di soglie e la manutenzione delle opere esistenti.

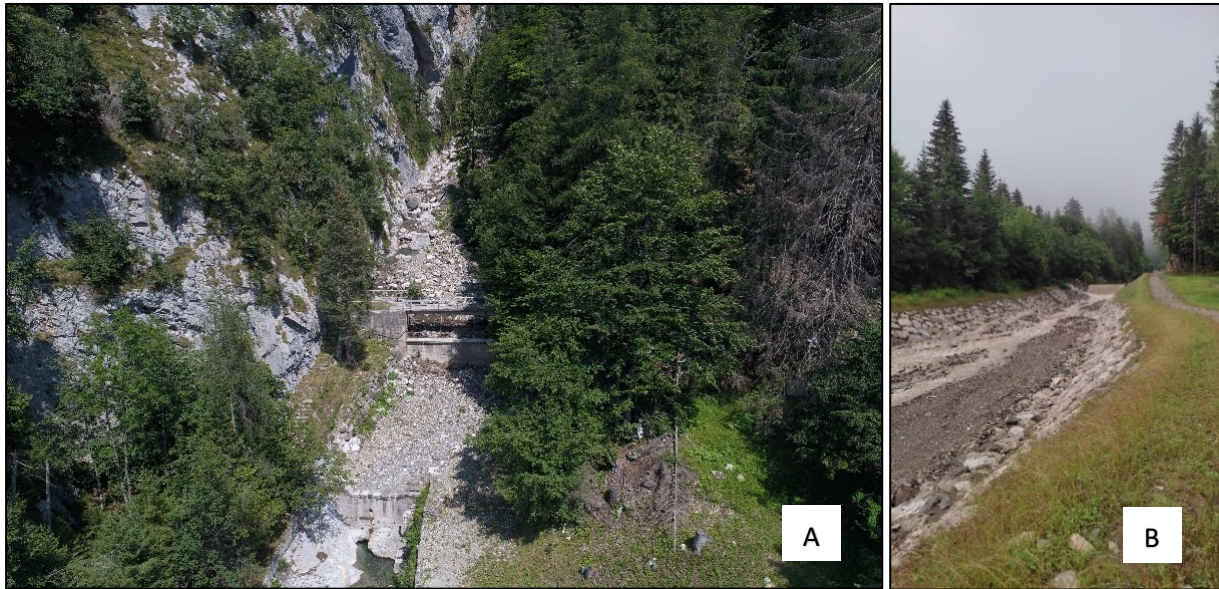


Fig. 6 A) Tratto di alveo confinato; B) Tratto sistemato.

## 3.2 Condizioni climatiche

I fattori che influenzano il clima della regione Friuli Venezia Giulia sono la posizione geografica e l'orografia. Geograficamente, la regione è situata alle medie latitudini, dove si creano frequentemente perturbazioni che si inseriscono nelle correnti occidentali prevalenti e sono dovute al contrasto tra le masse d'aria polare e tropicale. La presenza delle Alpi, e la loro disposizione rispetto alla circolazione prevalente delle masse d'aria, influenza fortemente la temperatura, l'umidità e la direzione delle masse d'aria generando i processi di *Foehn* (vento caldo e secco discendente dalle Alpi) e di *Stau* (la presenza di una catena montuosa genera un effetto di sbarramento che innalza le masse d'aria calda le quali si raffreddano e danno luogo a precipitazioni) (Il clima del Friuli Venezia Giulia, 2014).

Il clima della regione è dunque considerato un clima continentale moderato con connotazione umida. Le temperature medie mensili registrano valori massimi nei mesi di luglio e agosto e valori minimi nei mesi di dicembre e febbraio, con una differenza media di circa 12-13 °C tra le località più calde e quelle più fredde (Il clima del Friuli Venezia Giulia, 2014). Il regime pluviometrico regionale vede l'autunno come periodo più piovoso, infatti, le punte massime si verificano nel mese di novembre con picchi intorno a 1200- 1400 mm. Nei mesi di aprile e giugno si verifica il secondo periodo piovoso, mentre luglio e agosto sono i mesi siccitosi (Protezione Civile, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia). Le condizioni climatiche della Carnia sono caratterizzate da estati miti e da inverni freddi con il verificarsi di frequenti temporali durante il periodo estivo. La temperatura media annua è compresa tra i 6 e i 10 °C e le vallate sono riparate dai venti freddi provenienti da nord-est (Il clima

del Friuli Venezia Giulia, 2014). Le precipitazioni medie annue nella catena montuosa delle Alpi Carniche raggiungono i 1500-1700 mm (Cicogna, 2008).

### 3.3 Rilievo delle opere

Per la conoscenza della posizione e della tipologia di opere all'interno dei bacini in esame, è stato utilizzato come base dati il Catasto delle Opere di Sistemazione Idraulico-Forestali della Regione Friuli-Venezia Giulia (IRDAT, 2018). Le informazioni presenti all'interno del catasto sono state poi verificate e aggiornate attuando le opportune analisi di campo. Gli strumenti impiegati per lo svolgimento dell'analisi di campo sono stati: dispositivo GNSS Spectra (Mobile Mapper 50), un telemetro laser TruPulse 200 e una cordella metrica.

Il dispositivo GNSS, utilizzando l'applicazione *MM Field*, ha permesso la costruzione di una tabella degli attributi. La tabella, costruita per ogni opera, ha raccolto i seguenti campi:

- Tipo di opera: briglia o soglia;
- Codice identificativo ID: ad ogni opera è stato assegnato un opportuno codice di identificazione, congruente con quello del catasto regionale (IRDAT, 2018), o definito dall'utente qualora l'opera in questione non fosse presente all'interno del catasto. Per la definizione del nuovo codice identificativo si è fatto riferimento al codice dell'opera presente a valle della stessa aggiungendo un suffisso -bis, -tris, etc;
- Georeferenziazione: definita nel sistema di coordinate RDN2008/UTM 33N;
- Orario di acquisizione della posizione GPS;
- Stato di conservazione: per la descrizione delle condizioni attuali dell'opera è stata utilizzata una scala di valori qualitativi definita dagli aggettivi buono, danneggiata e distrutta;
- Funzionalità: per la descrizione della funzionalità attuale dell'opera è stata utilizzata la scala qualitativa definita dagli aggettivi operativa, compromessa e nulla;
- Dimensioni: i valori di altezza e larghezza sono state effettuate utilizzando il telemetro laser TruPulse 200;
- Immagini fotografiche: scattate a monte e a valle di ogni opera;
- Note.

Le definizioni di stato e funzionalità si sono basate su una valutazione di tipo visivo, alcuni esempi sono riportati in Fig. 7.

Lo stato dell'opera è stato definito valutando le condizioni strutturali del corpo:

- Buono: l'opera non presenta parti danneggiate;
- Danneggiata: l'opera presenta parti danneggiate; le considerazioni sono state fatte in merito allo stato della gaveta, alla condizione di ali e corpo;
- Distrutta: l'opera è gravemente danneggiata;

La funzionalità dell'opera è stata valutata in merito alla gestione del sedimento., e/o alla consolidazione dei versanti e del fondo dell'alveo:

- Operativa: l'opera svolge le funzioni per cui è stata progettata; buona gestione del sedimento, concentrazione del flusso idrico al centro della gaveta e controllo dell'erosione spondale.
- Compromessa: l'opera manca di almeno una delle funzioni descritte in precedenza;
- Nulla: l'opera non svolge alcun tipo di funzione; cattiva o nulla gestione del sedimento con sovralluvionamento leggero o importante, inoltre la presenza dell'opera contribuisce al verificarsi di fenomeni erosivi in alveo e/o di versante.

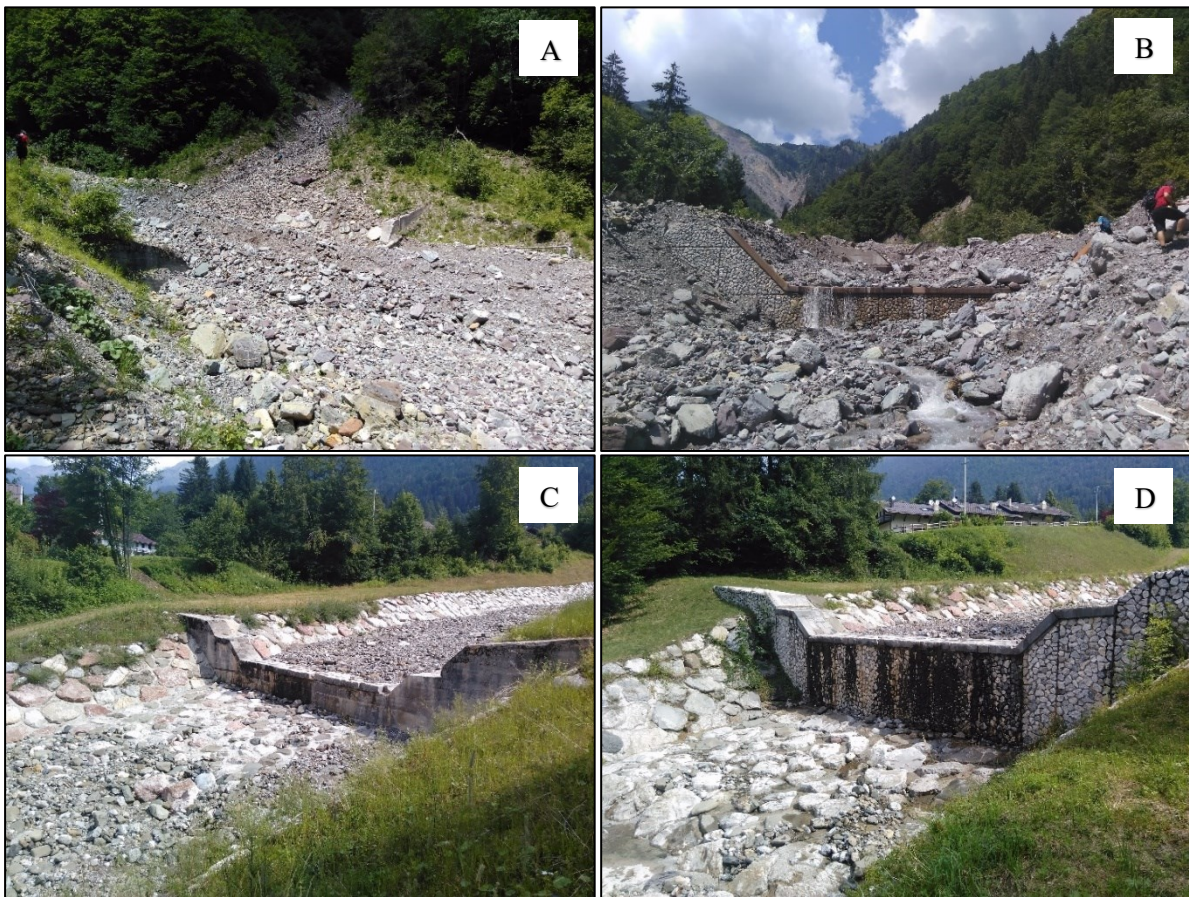


Fig. 7 Esempi di opere: A) Funzionalità nulla; B) Stato buono, funzionalità compromessa; C) Stato danneggiata, funzionalità compromessa; C) Stato buono, funzionalità operativa.



Tale database ha permesso la costruzione di un file vettoriale *Shapefile (.shp)* contenente le informazioni riportate precedentemente e necessario per le successive elaborazioni tramite l'utilizzo del software ArcMap versione 10.8.2.

Le tipologie di opere di sistemazione idraulico forestale rilevate all'interno dei bacini in esame sono briglie, soglie di fondo e opere di difesa spondale. Ai fini dello studio dell'interazione tra opere e sedimento sono state prese in considerazione solo le opere trasversali ovvero briglie e soglie di fondo (Fig. 8 e 9).

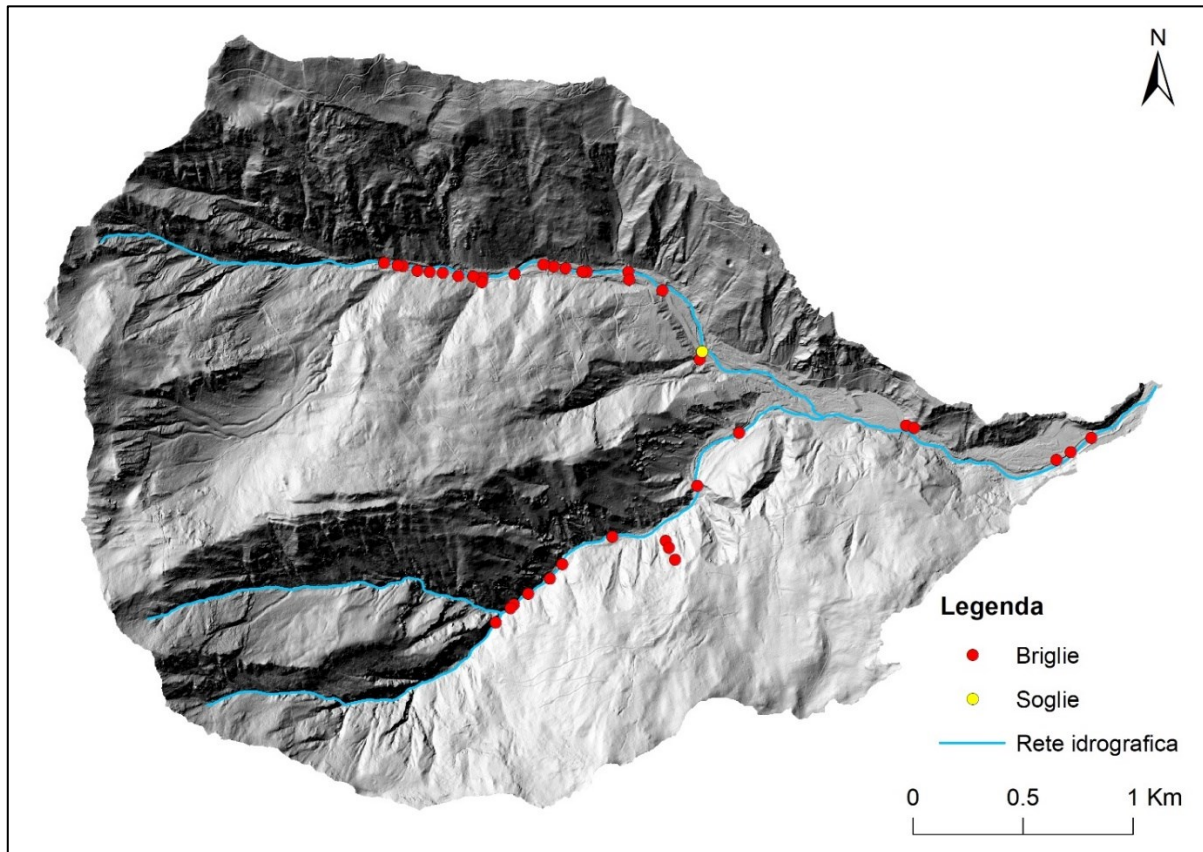


Fig. 8 Opere trasversali Rio Miozza.

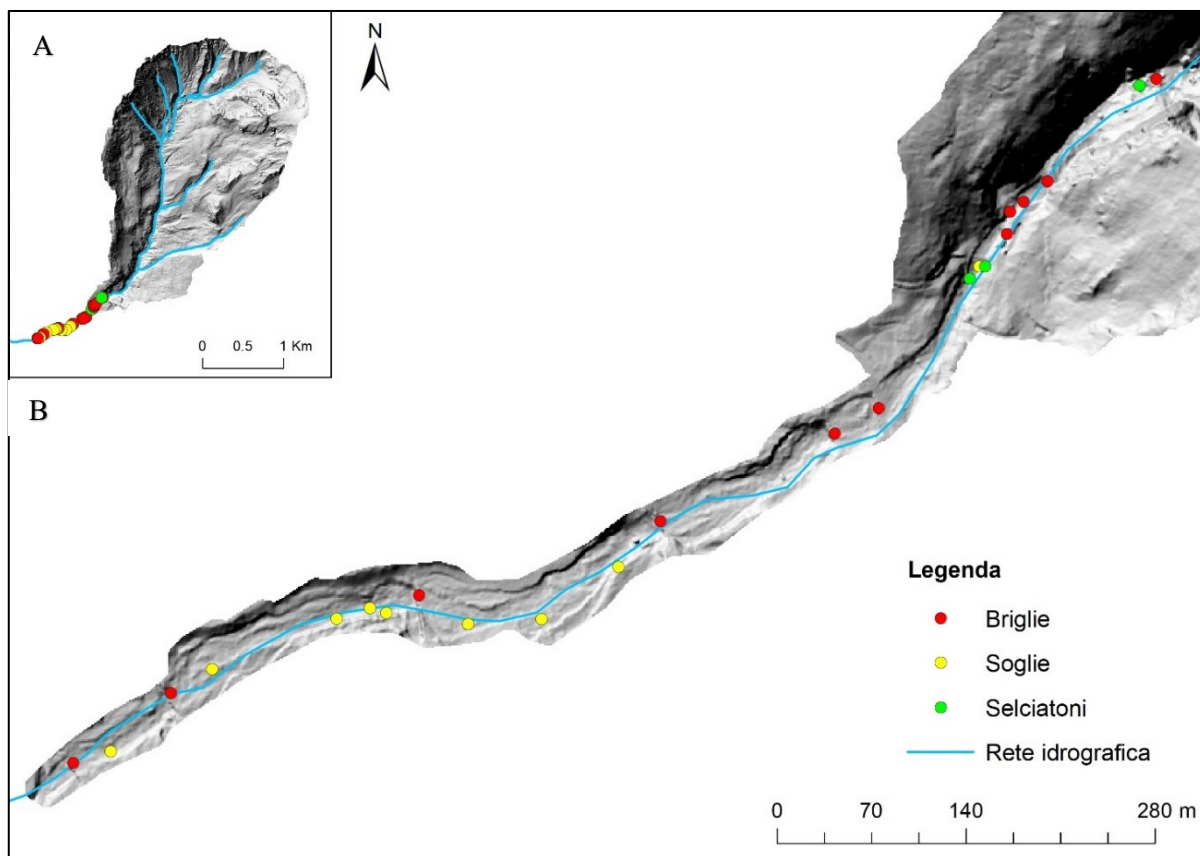


Fig. 9 Opere trasversali Rio Agozza. A) Localizzazione all'interno del bacino; B) Dettaglio.

### 3.4 Analisi DoD

Per comparare e analizzare le differenze topografiche tra il DTM del 2009 e il DTM del 2018 è stata utilizzata la metodologia del “DEM of Difference” con acronimo “DoD”.

L’operazione consiste nel sottrarre il DTM più recente a quello meno recente. In questo caso il DTM del 2018 è stato sottratto al DTM del 2009 ai fini di ottenere le differenze topografiche di deposizione ed erosione avvenute nel dato range di tempo all’interno dei due bacini.

#### 3.4.1 Dati topografici

La base dati sulla quale si sono effettuate le successive analisi è stata la nuvola di punti ottenuta da volo LiDAR e le ortofoto rilevate contestualmente al volo.

I rilievi LiDAR per gli anni 2009 e 2018 sono stati resi disponibili dalla Protezione Civile del Friuli-Venezia Giulia. I punti suolo sono stati poi interpolati la fine di ottenere i modelli digitali del terreno (DTM).

Per quanto concerne l'anno 2009, il volo LiDAR è stato effettuato nel periodo 2006-2010 dalla Protezione Civile della Regione a fini di attività istituzionali. Il DTM con passo di 1 m è stato ottenuto dall'interpolazione dei punti del rilievo LiDAR la cui densità è di 4 punti per m<sup>2</sup>. Il grigliato utilizzato è in formato ARC/INFO ASCII GRID. Al dato è abbinato anche il modello a ombre (*hillshade*) in formato .tif che consente la visualizzazione immediata del dato e l'ortofoto in formato .ecw rilevata contestualmente al volo LiDAR.

Per quanto concerne l'anno 2018, invece, il rilievo LiDAR è stato svolto tra gli anni 2017 e 2020 dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Il volo è stato effettuato da elicottero utilizzando lo strumento RIEGL LMS-Q780. La densità è di 16 punti per m<sup>2</sup> fino ad una quota di 1000 m s.l.m. e di 10 punti per m<sup>2</sup> alle quote superiori. Nell'anno 2018 i voli LiDAR, per quanto concerne la testata di entrambi i bacini, sono stati effettuati precedentemente all'evento della tempesta Vaia (ottobre 2018) mentre per la restante superficie, a seguito dell'evento. Ai fini dello svolgimento delle analisi qui riportate, tale discrepanza non implica particolari problematiche in quanto la porzione di canale esaminata (Fig.10A e B) ricade completamente all'interno della nuvola di punti rilevata post evento Vaia.

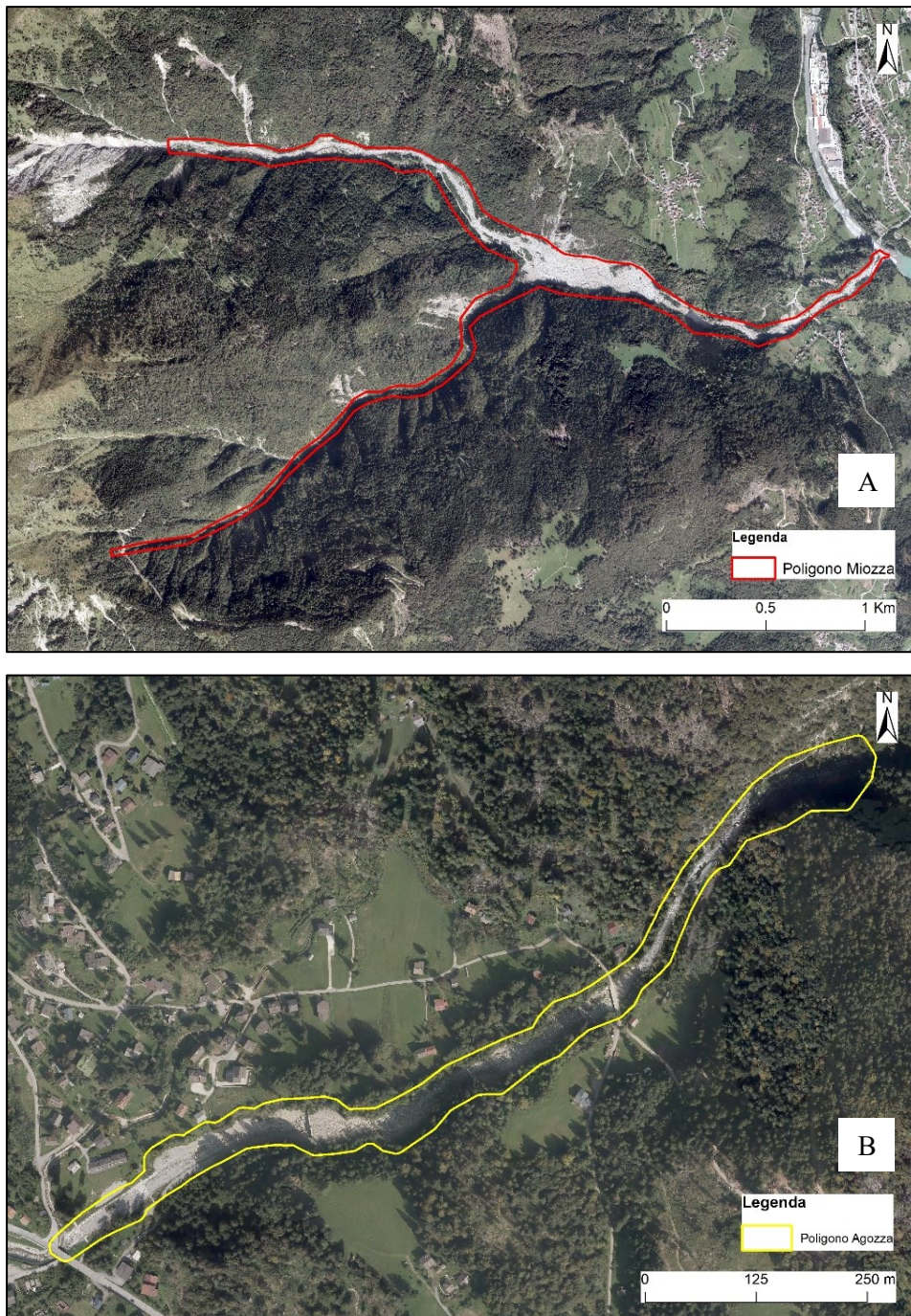
I file della nuvola di punti per 2009 e 2018 sono in formato .LAZ.

In seguito, la tabella 3 riporta le informazioni riassuntive.

*Tabella 3 Informazioni Rilievo LiDAR, nuvola di punti, DTM.*

	<b>2009</b>	<b>2018</b>
<b>RILIEVO LIDAR</b>		
Effettuato da	Protezione civile FVG	Regione Autonoma FVG
Periodo	2006-2010	2017-2020
Strumento utilizzato	-	RIEGL LMS-Q780 (da elicottero)
Sistema di coordinate	RDN2008/ TM33	RDN2008/ TM33
<b>NUVOLA DI PUNTI</b>		
Densità (Numero punti/ m <sup>2</sup> )	4	16 (fino a 1000 m s.l.m.) 10 (superiore a 1000 m s.l.m.)
Formato	LAZ	LAZ
<b>DTM</b>	-	-
Formato	ARC/INFO ASCII GRID	-
Passo (m)	1	1

Sulla base delle ortofoto del 2009 e del 2018, per entrambi i bacini, è stato costruito un poligono in formato vettoriale per isolare l'area del canale attivo sistemato, dal resto del bacino entro il quale si sono poi effettuate le successive elaborazioni. Le figure 10A e B riportano i poligoni che sottendono la zona in questione. In questo modo è possibile analizzare le dinamiche di sedimento avvenute all'interno del canale e l'interazione di tali dinamiche con le opere di sistemazione.



*Fig. 10 A) Poligono di interesse lungo l'asta principale del Rio Miozza; B) Poligono di interesse lungo l'asta principale del Rio Agozza.*

### 3.4.2 Valutazione dell'incertezza

Per ottenere un DoD affidabile è necessario discriminare le differenze reali della superficie da quelle non reali date da errori di elaborazione e di raccolta dati.

A tale scopo, il *plug-in* di ArcGIS utilizzato è il *Geomorphic Change Detection* (GCD) sviluppato da Wheaton et al., (2010). Per definire l'errore spaziale, il metodo è basato sul sistema del *Fuzzy Interference Systems* (FIS).

GCD è stato utilizzato per la stima del volume mobilizzato all'interno del bacino attraverso l'analisi DoD sia in termini qualitativi che quantitativi. Inoltre, fornisce un metodo per discriminare i cambiamenti reali da quelli non reali (rumore) considerando il livello di incertezza individuale dei DTMs e l'errore di propagazione nel DoD finale.

L'utilizzo del *plug-in* GCD necessita dei seguenti input:

- DTMs;
- Superfici associate;
- Definizione della modalità di calcolo dell'errore esteso alla superficie del DTM (impostazione di un modello a errore uniformemente distribuito all'interno della superficie o assegnazione di un modello a logica FIS).

#### 3.4.2.1 Fuzzy Interference System

Il livello di incertezza per ogni DTM è stato definito applicando la logica del *Fuzzy Interference System* prendendo in considerazione come *proxy* la pendenza e la densità di punti.

La valutazione dell'incertezza di un DTM è fondamentale per quantificare l'incertezza totale nell'interpretazione geomorfologica (Wheaton, 2008).

Come descritto da Wheaton (2008) il sistema *fuzzy* consiste di 4 componenti:

- Specificare il tipo di FIS, il metodo operativo, e le regole;
- Definire le funzioni di appartenenza (*Membership Function*; MFs) per ogni variabile di input;
- Definire le regole di relazione tra input e output;
- Definire le funzioni di appartenenza per l'output.

Gli input e gli output sono variabili che vengono definite secondo funzioni di appartenenza. La variabile viene definita secondo aggettivi qualitativi (ad esempio: alto, medio, basso) ai quali vengono associati gli intervalli numerici.

La definizione delle regole è il processo che consente di relazionare input con un singolo valore di output.

L'output finale è la mappa dell'incertezza verticale per ogni DTM, che verrà propagata all'interno del DoD attraverso la formula (1) (Brasington et al., 2000; Lane et al., 2003).

$$minLoD = t\sqrt{(\delta z_{DTMNew})^2 + (\delta z_{DTMOld})^2} \quad (1)$$

dove, *minLoD* è il livello minimo di quantificazione, ovvero, la soglia minima di errore nel DoD dato da  $\delta z_{DTMNew} - \delta z_{DTMOld}$  con livello di incertezza dato da  $\delta z$ . I parametri  $\delta z_{DTMNew}$  e  $\delta z_{DTMOld}$  definiscono l'incertezza dei due DTM (2009 e 2018). L'attributo *t* indica il valore di *t* di Student in un intervallo di confidenza definito calcolato secondo la formula seguente (2).

$$t = \frac{|z_2 - z_1|}{\sqrt{(\delta z_{DTMNew})^2 + (\delta z_{DTMOld})^2}} \quad (2)$$

Dove  $z_2 - z_1$  è la differenza di elevazione rilevata in ogni cella del raster. Se tale differenza è più piccola del *minLoD* il cambiamento è definito come incerto nell'intervallo di confidenza scelto.

### 3.4.3 Applicazione GCD e calcolo DoD

Le operazioni, in seguito, sono state svolte per entrambi i bacini del Rio Miozza e Agozza.

Come riportato precedentemente, gli input necessari per l'utilizzo del *plug-in Geomorphic Change Detection* (GCD) sono:

- DTM 2009 e DTM 2018;
- Superfici associate scelte in questo lavoro per il calcolo dell'errore: il raster della pendenza e il *raster* della densità di punti.

Partendo dal DTM, si sono calcolati i due file raster utilizzati successivamente nel sistema FIS come *proxy* per il calcolo dell'incertezza. Pendenza e densità dei punti possono essere direttamente calcolati nell'ambito GCD.

Calcolate le superfici associate, ad ogni DTM successivamente è stato assegnato l'errore attraverso la logica FIS.

Per ogni variabile scelta per il calcolo dell'errore associato ad ogni cella *raster* per ogni DTM e per ogni bacino sono state assegnate le MFs.

In riferimento al bacino del Rio Miozza, per la pendenza [Input 1] sono state definite 3 MFs definite dai livelli basso, medio e alto con un range da 0 a 90°.

La densità di punti è stata classificata in 2 MFs definite come basso e medio con un range da 0 a 40 pt/m<sup>2</sup>. Il livello di incertezza è stato definito da 3 MFs con un range da 0 a 1.57 e i livelli basso, medio e alto. Sono state impostate poi 6 regole.

In riferimento al bacino del Rio Agozza, la pendenza [Input 1] è stata definita da 2 MFs con i livelli basso e alto e un range da 0 a 90°. La densità di punti è stata classificata in 2 MFs definite come basso e medio con un range da 0 a 35 pt/m<sup>2</sup>. Il livello di incertezza è stato definito da 3 MFs con un range da 0 a 1.57 e i livelli basso, medio e alto. Le regole impostate sono 4.

Per quanto concerne la definizione delle regole, esse sono state definite secondo la seguente logica:

- bassi valori di pendenza definiscono bassa incertezza nell'output finale;
- bassi valori di densità di punti definiscono alta incertezza nell'output finale.

A seguito, la scheda FIS utilizzata per ogni bacino.

[System] Name='Miozza' Type='mamdani' Version=2.0 NumInputs=2 NumOutputs=1 NumRules=6 AndMethod='min' OrMethod='max' ImpMethod='min' AggMethod='max' DefuzzMethod='centroid'	
[Input1] Name='Slope' Range=[0 90] NumMFs=3 MF1='Low':trapmf,[0 0 5 10] MF2='Medium':trapmf,[10 15 25 35] MF3='High':trapmf,[35 38 40 90]	[Input2] Name='PointDensity' Range=[0 40] NumMFs=2 MF1='Low':trapmf,[0 0 4 16] MF2='Medium':trapmf,[4 16 20 40]
[Output1] Name='ElevUncertainty' Range=[0 1.57] NumMFs=3 MF1='Low':trapmf,[0 0 0.1 0.25] MF2='Medium':trapmf,[0.1 0.25 0.4 0.5] MF3='High':trapmf,[0.5 0.7 1.24 1.57]	[Rules] 1 1, 2 (1) : 1 1 2, 1 (1) : 1 2 1, 3 (1) : 1 2 2, 2 (1) : 1 3 2, 3 (1) : 1 3 1, 3 (1) : 1

[System] Name='Agozza' Type='mamdani' Version=2.0 NumInputs=2 NumOutputs=1 NumRules=4 AndMethod='min' OrMethod='max' ImpMethod='min' AggMethod='max' DefuzzMethod='centroid'	
[Input1] Name='Slope' Range=[0 90] NumMFs=2 MF1='Low':trapmf,[0 0 12.5 25] MF2='Medium':trapmf,[25 35 45 90]	[Input2] Name='PointDensity' Range=[0 35] NumMFs=2 MF1='Low':trapmf,[0 0 3 7] MF2='Medium':trapmf,[3 7 14 35]
[Output1] Name='ElevUncertainty' Range=[0 1.57] NumMFs=3 MF1='Low':trapmf,[0 0 0.1 0.25] MF2='Medium':trapmf,[0.1 0.25 0.4 0.5] MF3='High':trapmf,[0.5 0.7 1.24 1.57]	[Rules] 1 1, 2 (1) : 1 1 2, 1 (1) : 1 2 1, 3 (1) : 1 2 2, 2 (1) : 1

Dopo aver definito gli input, si procede all'inserimento del foglio FIS per il calcolo dell'errore. La superficie dell'errore per ogni DTM viene dunque calcolata seguendo lo schema del foglio FIS ed utilizzando le due superfici di input *proxy* precedentemente calcolate.

Il calcolo del DoD viene impostato all'interno del *plug-in* GCD utilizzando la funzione *Add new change detection*. Questa finestra operativa richiede l'inserimento dei DTM, l'impostazione della soglia probabilistica di livello di confidenza e l'associazione ad entrambi i DTM dell'errore calcolato. Ai bacini è stato associato un intervallo di confidenza di 0.80.

Il risultato finale è un *raster* che riporta la variazione di altezza di sedimento (m) positiva e negativa tra i DTM degli anni 2009 e 2018; pixel con valori positivi segnalano deposizione, valori negativi erosione.

CGD restituisce anche la tabella con le informazioni riportate in figura 11 ovvero:

- l'area interessata da erosione e deposizione;
- il volume interessato da erosione e deposizione;
- il volume mobilizzato;
- il volume netto;
- l'altezza media lungo la verticale di erosione e deposizione;
- percentuali del volume di deposizione e di erosione.



Attribute
<b>AREAL</b>
Total Area of Surface Lowering (m <sup>2</sup> )
Total Area of Surface Raising (m <sup>2</sup> )
Total Area of Detectable Change (m <sup>2</sup> )
Total Area of Interest (m <sup>2</sup> )
Percent of Area of Interest with Detectable Change
<b>VOLUMETRIC</b>
Total Volume of Surface Lowering (m <sup>3</sup> )
Total Volume of Surface Raising (m <sup>3</sup> )
Total Volume of Difference (m <sup>3</sup> )
Total Net Volume Difference (m <sup>3</sup> )
<b>VERTICAL AVERAGES</b>
Average Depth of Surface Lowering (m)
Average Depth of Surface Raising (m)
Average Total Thickness of Difference (m) for Area of Interest
Average Net Thickness of Difference (m) for Area of Interest
Average Total Thickness of Difference (m) for Area with Detectable Change
Average Net Thickness of Difference (m) for Area with Detectable Change
<b>PERCENTAGES (BY VOLUME)</b>
Percent Elevation Lowering
Percent Elevation Raising
Percent Imbalance (departure from equilibrium)
Net to Total Volume Ratio

*Fig. 11 Restituzione dei dati da parte di CGD a seguito del calcolo del DoD.*

Per filtrare ulteriormente i punti dati dal rilievo LiDAR, riducendo il rumore, sono state individuate delle aree di interesse.

Tali aree di interesse sono state applicate in post-processing all'analisi DoD, per escludere i pixel che presentavano valori estremi non coerenti con la situazione reale rilevata in campo. In particolare, per il bacino del Rio Miozza, l'area di interesse è stata costruita escludendo pixel con valori maggiori di 8 m di erosione/deposizione, l'area di interesse, sulla quale si è effettuata l'analisi DoD ricadeva dunque in un range di valori di pixel tra -8 m e +8 m (Fig. 12A); il range di valori per il bacino del Rio Agozza è stato definito tra valori di -5 m e +5 m (Fig. 12B).

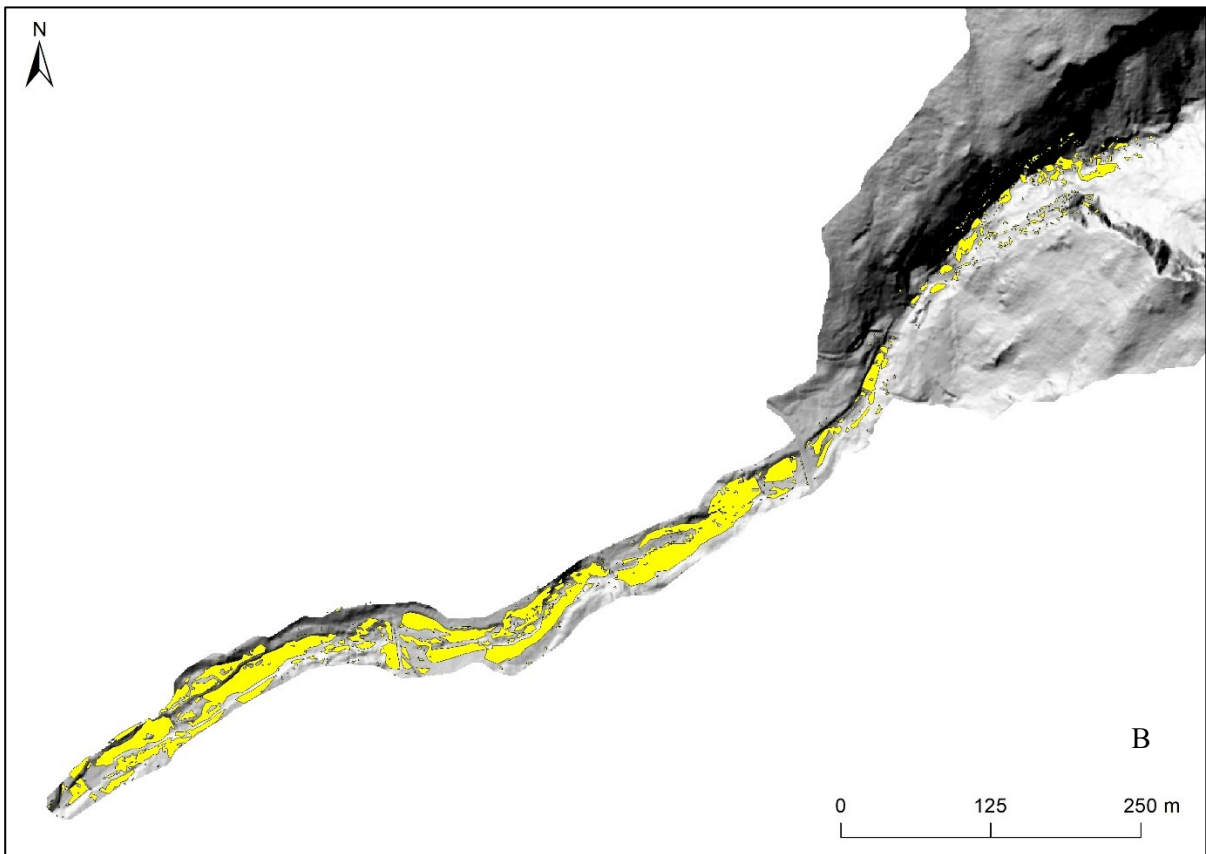
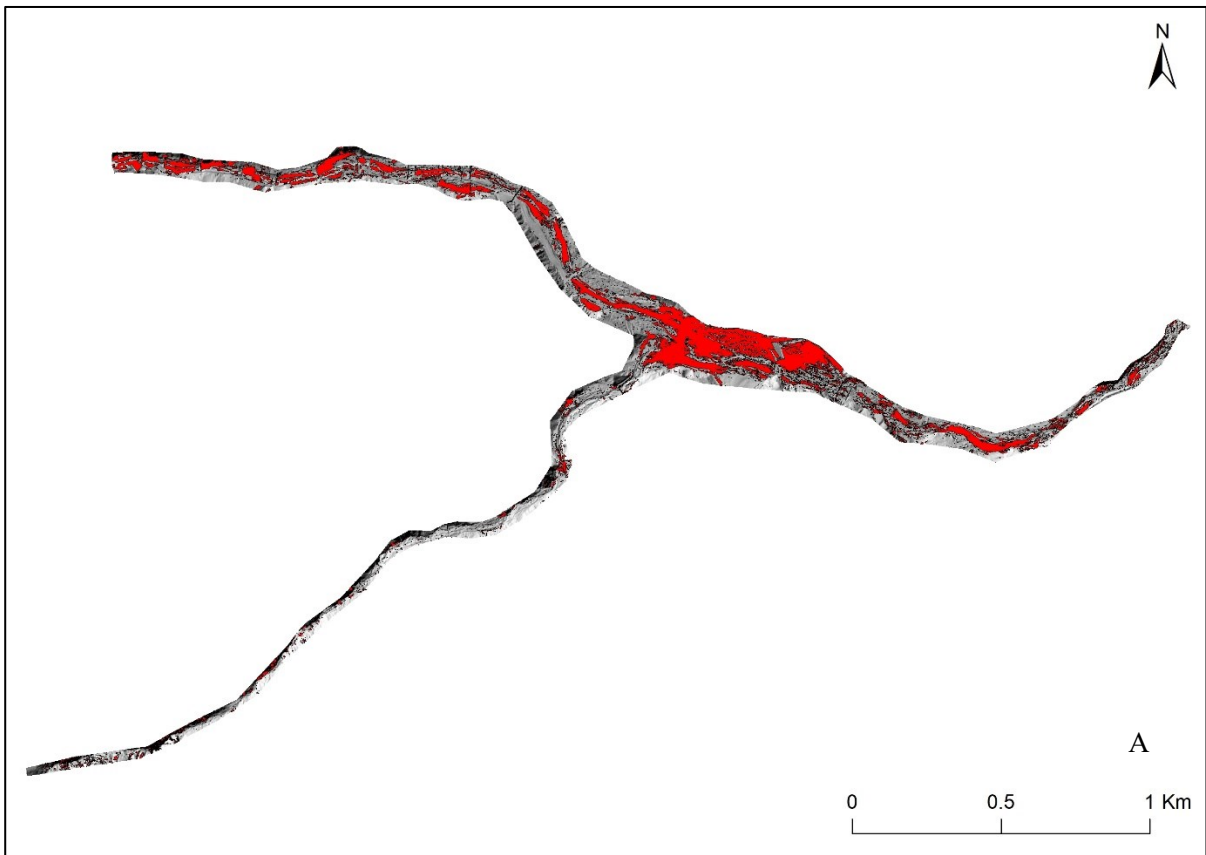


Fig. 12 A) Area di interesse Rio Miozza; range di valori [-8;+8 m ]; B) Area di interesse Rio Agozza; range di valori [-5;+5 m].

### 3.5 Tratti di studio

All'interno del canale principale di entrambi i bacini, definito dai poligoni in figura 12A e B, sono stati individuati dei tratti per ottenere un'analisi DoD più dettagliata in termini qualitativi e quantitativi. I tratti sono stati scelti sulla base di stato e funzionalità delle opere, in particolare dove si trovano opere danneggiate e a funzionalità compromessa ad esclusione di un'opera all'interno del bacino del Rio Agozza.

I dati dei tratti di studio del bacino del Rio Miozza (M1, M2, M3) sono riportati in tabella 4

*Tabella 4 Dati tratti di studio Rio Miozza.*

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
Lunghezza (m)	508	305	243
Pendenza (°)	10,2	10,7	15

I dati dei tratti di studio del bacino del Rio Agozza (A1, A2) sono riportati in tabella 5

*Tabella 5 Dati tratti di studio Rio Agozza.*

	<b>A1</b>	<b>A2</b>
Lunghezza (m)	202	182
Pendenza (°)	5	5,7

Il canale principale del Rio Agozza, ed in particolare il tratto A1, nel 2020 ha subito una sistemazione idraulica all'interno dell'alveo. Il progetto ha previsto la sistemazione delle erosioni spondali tramite la costruzione di scogliere in pietrame di grosse dimensioni intassate con calcestruzzo e la manutenzione delle briglie esistenti. Pertanto, è opportuno riconoscere che l'analisi DoD effettuata mediante l'utilizzo di DTM dell'anno 2018 potrà portare a discrepanze con i rilievi di campo effettuati nel 2022. Per questo motivo, le valutazioni sullo stato e sulla funzionalità effettuate in campo, nel caso di A1, non andranno a verificare o discutere direttamente i risultati del DoD ma serviranno ad aggiungere ulteriori informazioni sulle condizioni delle opere 2 anni dopo la loro manutenzione.

## 4 RISULTATI

### 4.1 Stato delle opere

Le analisi di campo hanno restituito le informazioni di stato, funzionalità e localizzazione GPS delle opere trasversali lungo il canale principale.

#### 4.1.1 Miozza

Il canale del bacino del Rio Miozza e del tributario in destra è sistemato con 34 opere trasversali tra cui 33 briglie e 1 soglia/guado (Tab. 6). Lungo il canale principale del Rio Miozza vi sono 24 briglie e 1 soglia/guardo, mentre il tributario Rio D'Archia presenta 8 briglie. Nel complesso, l'altezza media delle opere è di 4,4 m e la larghezza media è di 36,5 m. L'altezza e la larghezza massima e minima sono di 12,5 m, 1 m, 74 m e 11,7 m, rispettivamente. Il complesso sistematorio presenta 12 opere (36%) in buono stato, 20 (61%) danneggiate e nessuna distrutta (Tab.7; Fig. 13A). I danni più ricorrenti si riscontrano a livello della gaveta e del coronamento. La funzionalità di 22 opere (67%) è stata classificata come compromessa: Le cause sono sovralluvionamento, mancata centralizzazione del flusso d'acqua dovuto a danni alla gaveta, e sottoscavo a valle. La funzionalità nulla di 6 opere (18%) (Fig. 13B) è dovuta al completo sovralluvionamento e al raggiramento, mentre una briglia presenta la condizione di sifonamento.

Le opere che si trovano in buono stato e sono operative sono 5 (15%), altrettanto per le opere compromesse e con funzionalità nulla.

Tabella 6 Opere trasversali del Rio Miozza.

MIOZZA	n.
<b>OPERE TRASVERSALI</b>	<b>34</b>
<u>Briglie</u>	33
<u>Soglie</u>	1
<u>Altezza media (m)</u>	4,4
<u>Larghezza media (m)</u>	36,5

Tabella 7 Stato e funzionalità delle opere trasversali del Rio Miozza.

STATO	n.	%	FUNZIONALITÀ	n.	%
Buono	12	36	Operativa	5	15
Danneggiata	20	61	Compromessa	22	67
Distrutta	-	-	Nulla	6	18

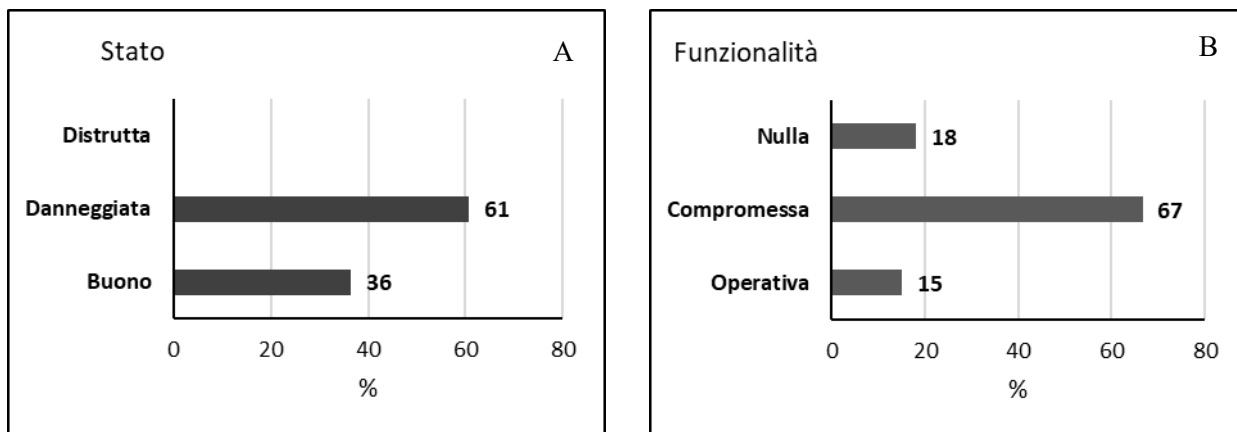


Fig. 13 A) Stato delle opere Rio Miozza; B) Funzionalità delle opere Rio Miozza.

#### 4.1.2 Agozza

Il canale del Rio Agozza è sistemato con 23 opere trasversali di cui 11 briglie, 9 soglie e 3 selciati (Tab. 8). Il complesso sistematorio presenta 17 opere in buono stato (74%), 5 opere danneggiate (22%) e 1 briglia distrutta (4%) (Tab. 9; Fig. 14A). La funzionalità di 12 opere è stata classificata come operativa (52%), mentre 11 opere presentano funzionalità compromessa (48%) e nessuna con funzionalità nulla (Tab.9; Fig. 14B). L'altezza media delle briglie è pari a 2,4 m mentre la larghezza media delle opere è pari a 17,9 m, con un'altezza e larghezza massima e minima di 4 m, 1 m, 44 m e 3,7 m, rispettivamente. Lo stato di danneggiato delle briglie è dovuto principalmente a danni alla gaveta e al sovralluvionamento. Per quanto concerne le soglie, la loro funzionalità compromessa è dovuta principalmente a sottoscavo ed erosione a valle e a monte di esse.

Le opere che si trovano in buono stato e sono operative sono pari a 11 (48%).

Tabella 8 Opere trasversali del Rio Agozza.

AGOZZA	n.
<b>OPERE TRASVERSALI</b>	<b>23</b>
<u>Briglie</u>	11
<u>Soglie</u>	9
<u>Selciati</u>	3
<u>Altezza media (m)</u>	2,4
<u>Larghezza media (m)</u>	17,9

Tabella 9 Stato e funzionalità delle opere trasversali del Rio Agozza.

STATO	n.	%	FUNZIONALITÀ	n.	%
Buono	17	74	Operativa	12	52
Danneggiata	5	22	Compromessa	11	48
Distrutta	1	4	Nulla	-	-

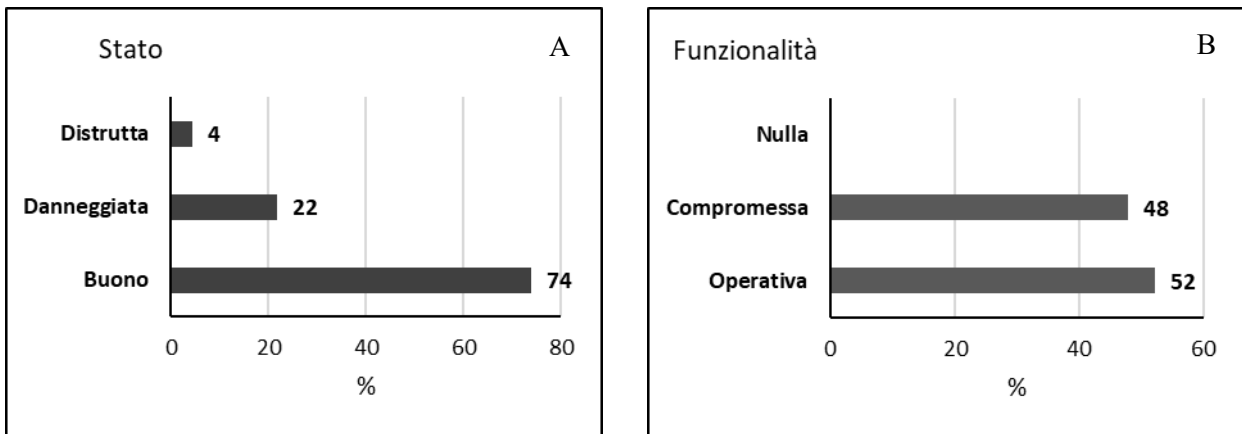


Fig. 14 A) Stato delle opere Rio Agozza; B) Funzionalità delle opere Rio Miozza.

## 4.2 Risultati analisi DoD

### 4.2.1 Miozza

Le analisi DoD 2009-2018 del canale principale del bacino del Rio Miozza (Fig. 15), hanno restituito un dato di deposizione pari a  $398767 \pm 122418 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $90097 \pm 39037 \text{ m}^3$  con una differenza netta di  $308670,31 \pm 128491,76 \text{ m}^3$  (Fig. 17). L'altezza media verticale sulla superficie di deposizione è pari a  $2,55 \pm 1,10 \text{ m}$  e di erosione a  $3,23 \pm 0,99 \text{ m}$  (Fig. 16). La deposizione si riscontra principalmente nella zona di confluenza tra il Rio D'Archia e il Rio Miozza mentre l'erosione nella zona a quote maggiori del Rio Miozza.

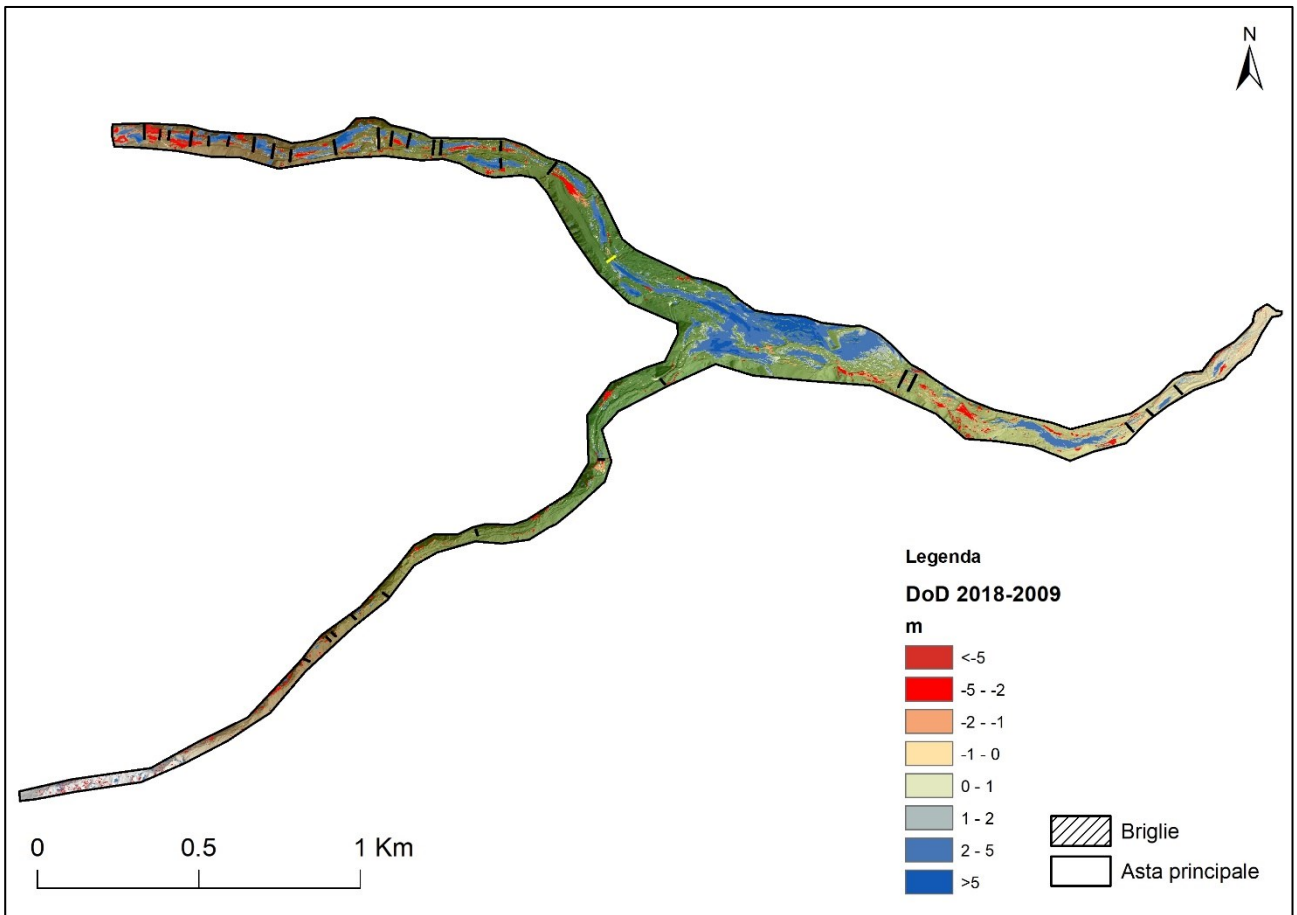


Fig. 15 Analisi DoD 2018-2009; bacino del Rio Miozza.

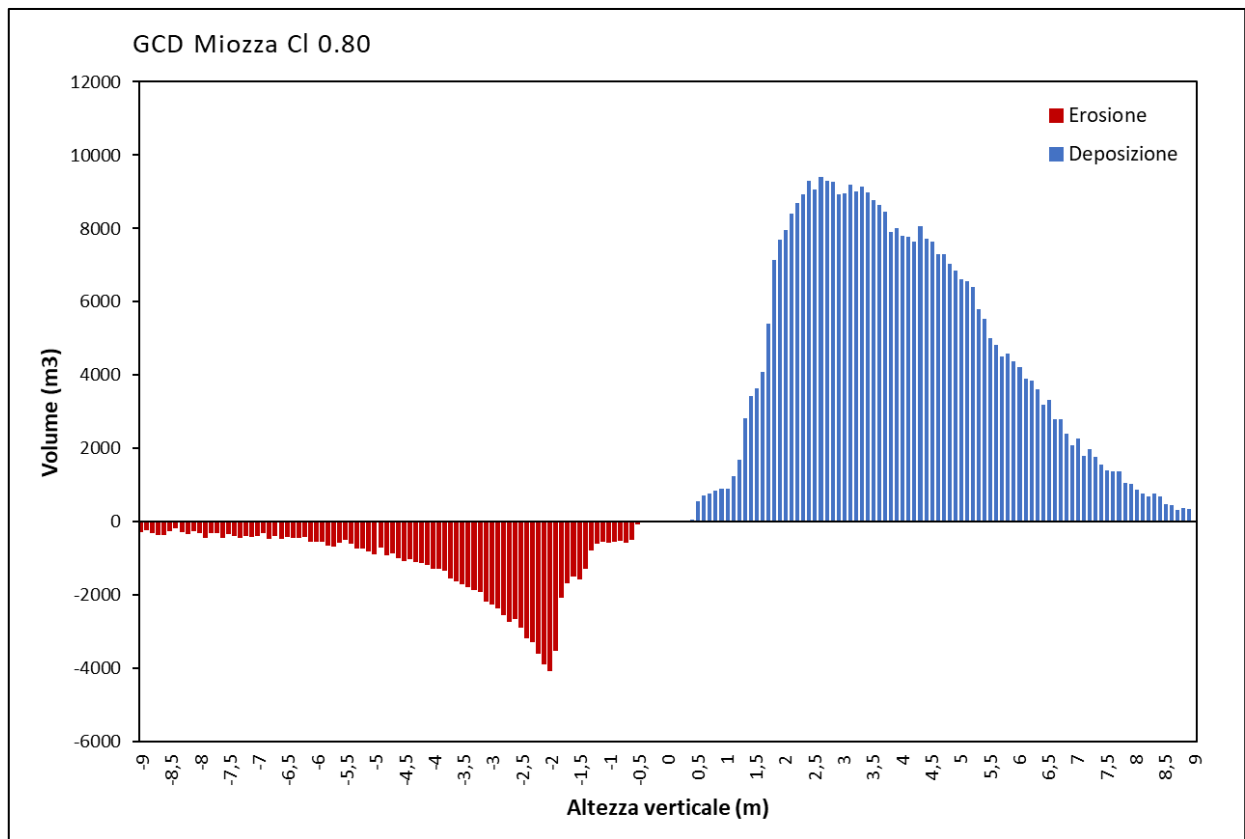


Fig. 16 Erosione e deposizione all'interno del canale principale del Rio Miozza.

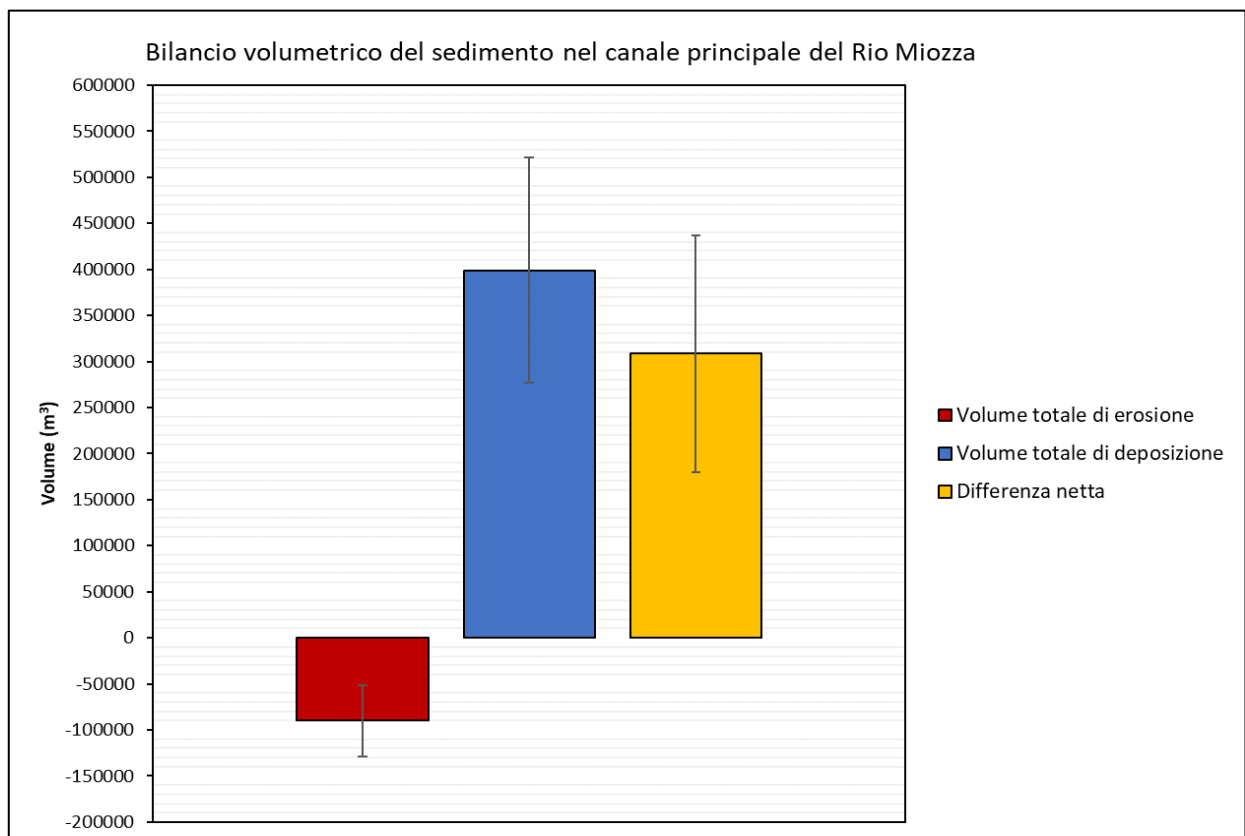


Fig. 17 Bilancio volumetrico del sedimento nel canale principale del Rio Miozza.



### 4.2.1.1 Tratti esaminati

L'analisi DoD svolta per il tratto M1 riporta un dato volumetrico di deposizione pari a  $27055 \pm 9444 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $11704 \pm 5410 \text{ m}^3$  con una differenza netta di  $15350,99 \pm 10884,76 \text{ m}^3$ . L'altezza media verticale sulla superficie di deposizione è pari a  $3,24 \pm 1,13 \text{ m}$  e di erosione pari a  $2,45 \pm 1,13 \text{ m}$ . La fig. 18 evidenzia come l'analisi DoD in corrispondenza della briglia Miozza\_10\_S (Fig. 19A), la cui funzionalità è compromessa e lo stato danneggiato, non presenta evidenti variazioni a monte, mentre a valle sono presenti un'area di deposizione in sinistra idrografica e una di erosione in destra idrografica. A monte e a valle della briglia F-11110-3-2\_tris (Fig. 19C), è visibile un'area di deposizione accentuata, sulla quale si è insediata vegetazione di tipo arboreo. Lo stato dell'opera è buono e la funzionalità è nulla dal punto di vista idraulico mentre svolge una funzione di protezione da un movimento franoso localizzato a monte di essa, come evidenziato dall'erosione sul versante in destra idrografica (Fig.18). A valle della briglia F-11110-3-2\_bis (Fig. 19B), sono presenti lobi di deposizione ed erosione dovuti alle diverse fasi di trasporto e al passaggio dei flussi liquido-solidi, la funzionalità è nulla da analisi di campo in quanto risulta sifonata. L'analisi DoD in prossimità della briglia F-11110-3-4\_bis (Fig. 19D) individua un'area/lobo di deposizione maggiore rispetto all'area di erosione a valle di essa. Da analisi di campo, la gaveta, le ali e la controbriaglia risultano danneggiate e la funzionalità compromessa.

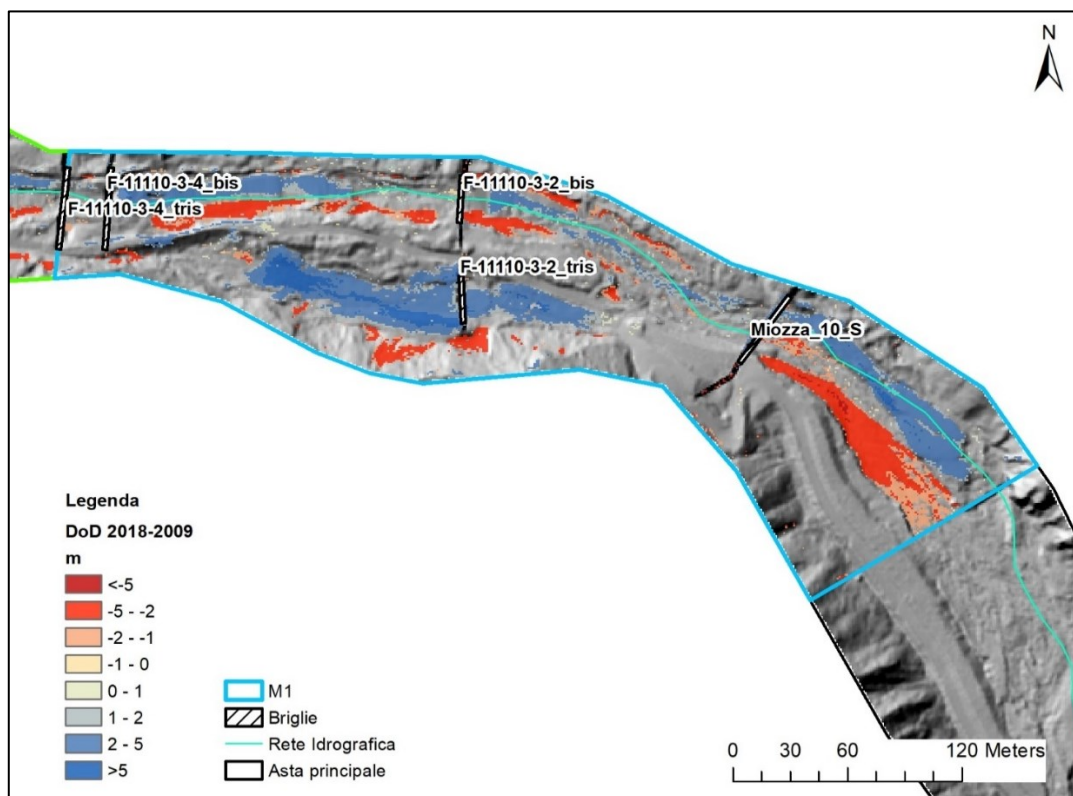


Fig. 18 DoD tratto M1 Rio Miozza



Fig. 19 A) Briglia Miozza\_10\_S; B) Briglia F-11110-3-2\_bis; C) Briglia F-11110-3-2\_tris; D) Briglia F-11110-3-4\_bis.

L'analisi DoD 2018-2009 per il tratto M2 restituisce un dato volumetrico di deposizione pari a  $22119 \pm 8247 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $4259 \pm 2184 \text{ m}^3$  con una differenza netta di  $17860,16 \pm 8532,10 \text{ m}^3$ . L'altezza media verticale sulla superficie di deposizione è pari a  $3,13 \pm 1,15 \text{ m}$  e di erosione è pari a  $2,29 \pm 1,18 \text{ m}$ . La fig. 20 evidenzia una zona di deposizione ininterrotta che si estende da monte a valle della briglia F-11110-4-4. Le analisi di campo confermano tale dato, in quanto la funzionalità risulta compromessa causa sovralluvionamento (Fig. 21A). L'analisi DoD a monte e a valle della briglia F-11110-4-4\_bis (Fig. 21B) individua una zona di aggiramento in sinistra idrografica, causa sovralluvionamento, riscontrata anche in campo. La briglia F-11110-4-4\_tris (Fig. 21C) da analisi di campo evidenzia una funzionalità compromessa con una deposizione a monte per 2/3 della larghezza e uno stato danneggiato (gaveta danneggiata). Da analisi DoD tale deposizione non è visibile, ma una moderata erosione (intervallo tra -1 e 0 m) è riscontrabile a monte della briglia. Infine, a valle della briglia F-11110-4-5\_bis (Fig 21D) è evidente una zona di deposizione estesa quasi all'intero alveo è confermata da analisi di campo, le quali riportano una funzionalità compromessa e sovralluvionamento per 3 metri.

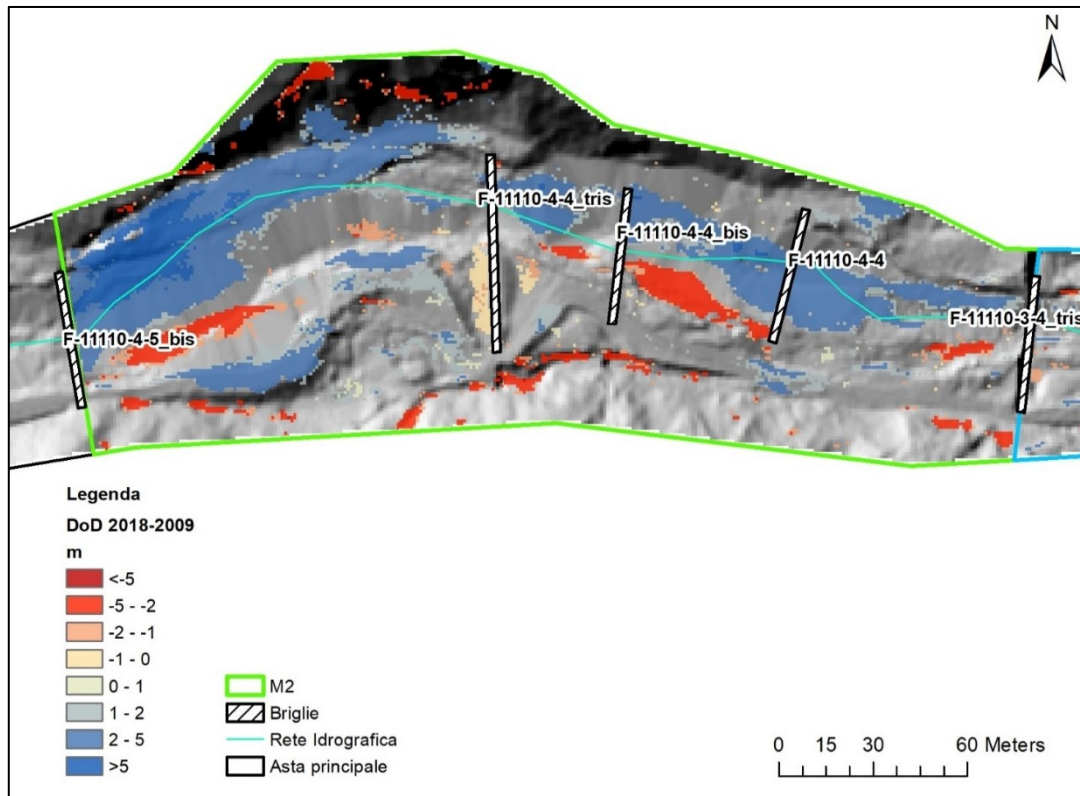


Fig. 20 DoD tratto M2 Rio Miozza

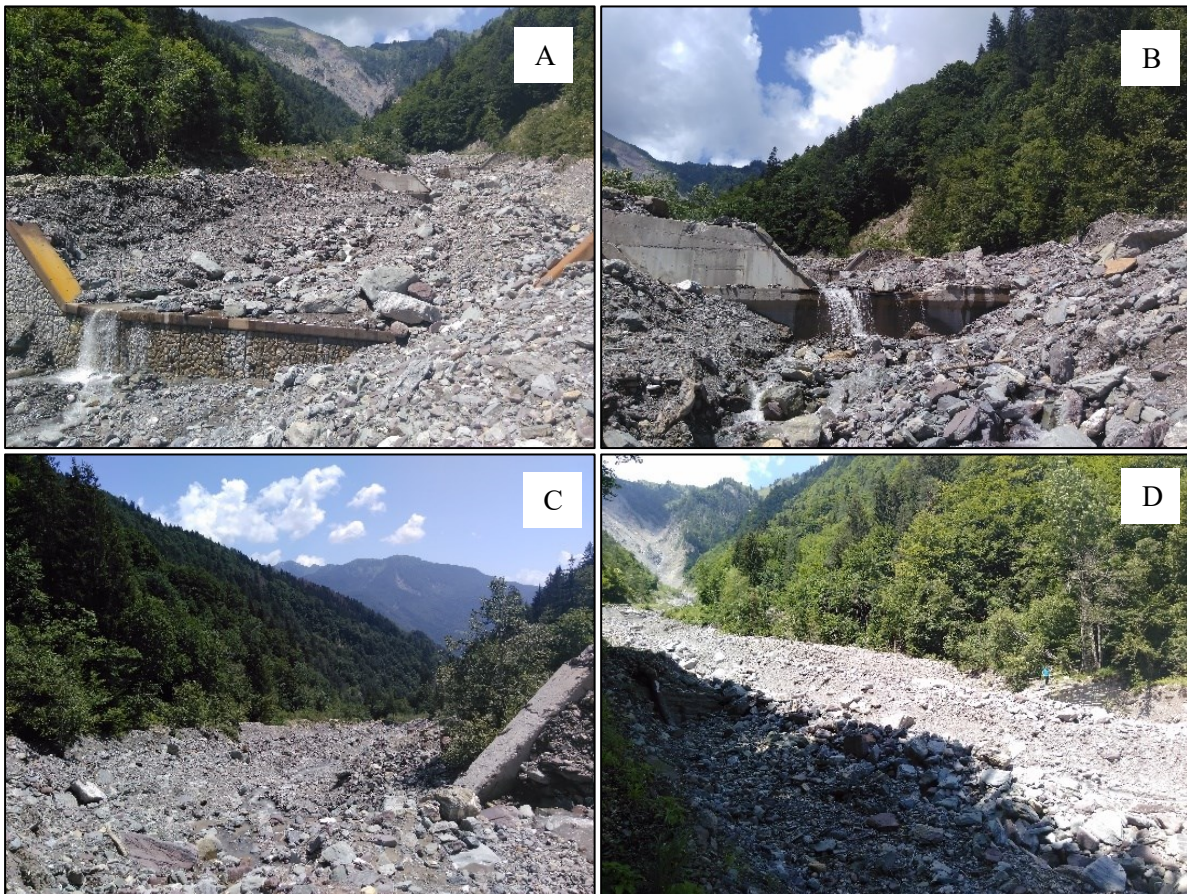


Fig. 21 A) Briglia F-11110-4-4; B) Briglia F-11110-4-4\_bis; C) Briglia F-11110-4-4\_tris; D) Briglia F-11110-4-5\_bis.

L'analisi DoD del tratto M3 fornisce un dato di deposizione pari a  $9804 \pm 3526 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $16109 \pm 5568 \text{ m}^3$  con una differenza netta di  $-6305,03 \pm 6590,91 \text{ m}^3$ . La media verticale sulla superficie di deposizione è di  $3,35 \pm 1,20 \text{ m}$  e l'erosione è di  $3,75 \pm 1,30 \text{ m}$ . In riferimento all'analisi DoD (Fig. 22), a valle della briglia F-11110-9-1\_bis (Fig. 23A) e a monte della F-11110-6-1\_tris si riscontra un dato di deposizione in sinistra idrografica e di erosione in destra idrografica. In particolare, le analisi di campo individuano l'opera F-11110-9-1\_bis (Fig. 23B) con funzionalità nulla in quanto soggetta a raggiramento, come evidente da una specifica e circoscritta area di deposizione posta in sinistra delle ali. A monte della briglia F-11110-9-1\_tris (Fig.23B), da DoD è visibile una marcata erosione in sinistra idrografica che da evidenze di campo risulta non essere così riconoscibile, con la briglia che presenta principalmente una tendenza al sovralluvionamento. Per quanto riguarda la briglia F-11110-9-1\_quater (Fig 23B) le analisi di campo confermano il dato fornito da analisi DoD che individua una marcata erosione a valle della briglia; infatti, essa risulta sottoscavata.

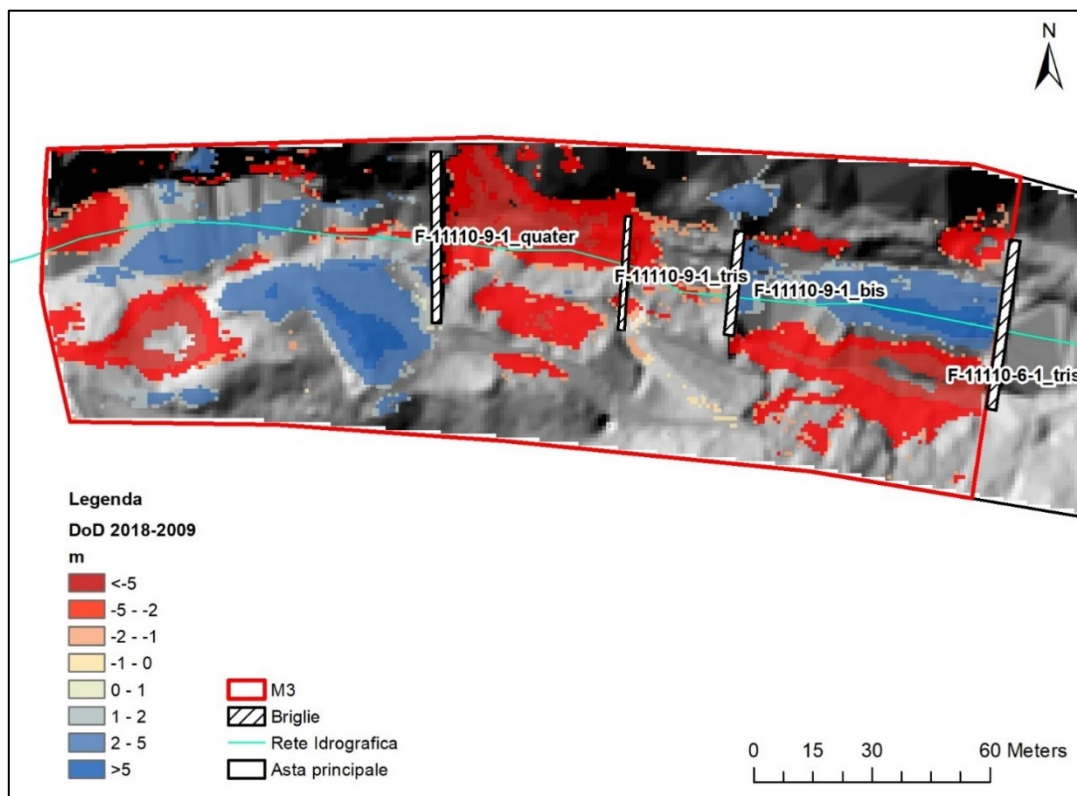


Fig. 22 DoD tratto M3 Rio Miozza



Fig. 23 A) Briglia F-11110-9-1\_bis B) Briglie F-11110-9-1\_tris e F-11110-9-1\_quater.

## 4.2.2 Agozza

L'analisi DoD 2018-2009 del canale principale del Rio Agozza, (Fig. 24) ha restituito un dato di deposizione pari a  $6577 \pm 2292 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $17264 \pm 5865 \text{ m}^3$  con una differenza netta di  $-10686,21 \pm 6298,07 \text{ m}^3$  (Fig. 26). L'altezza media verticale sulla superficie di deposizione è pari a  $1,28 \pm 0,45 \text{ m}$  e l'erosione è pari a  $1,76 \pm 0,60 \text{ m}$  (Fig. 25). La deposizione si riscontra principalmente lungo il tratto situato a monte della sezione di chiusura mentre l'erosione lungo il tratto A2 (Fig. 31).

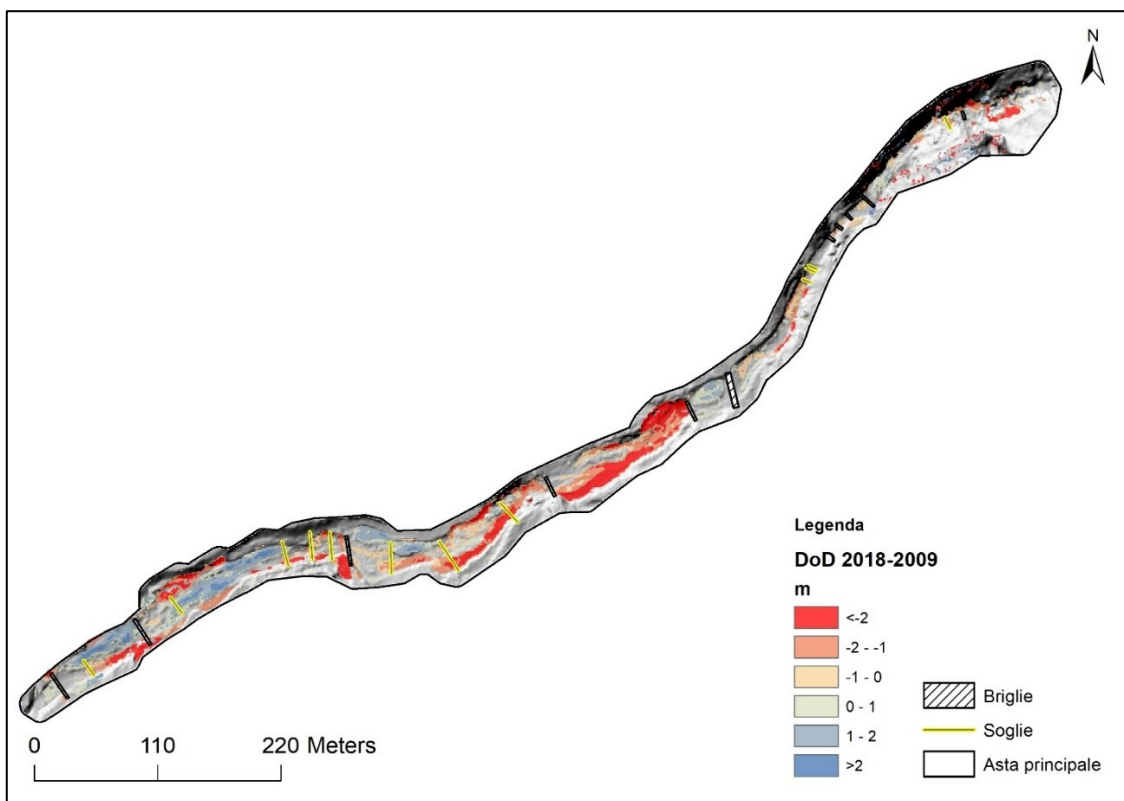


Fig. 24 Analisi DoD 2009-2018; Rio Agozza.

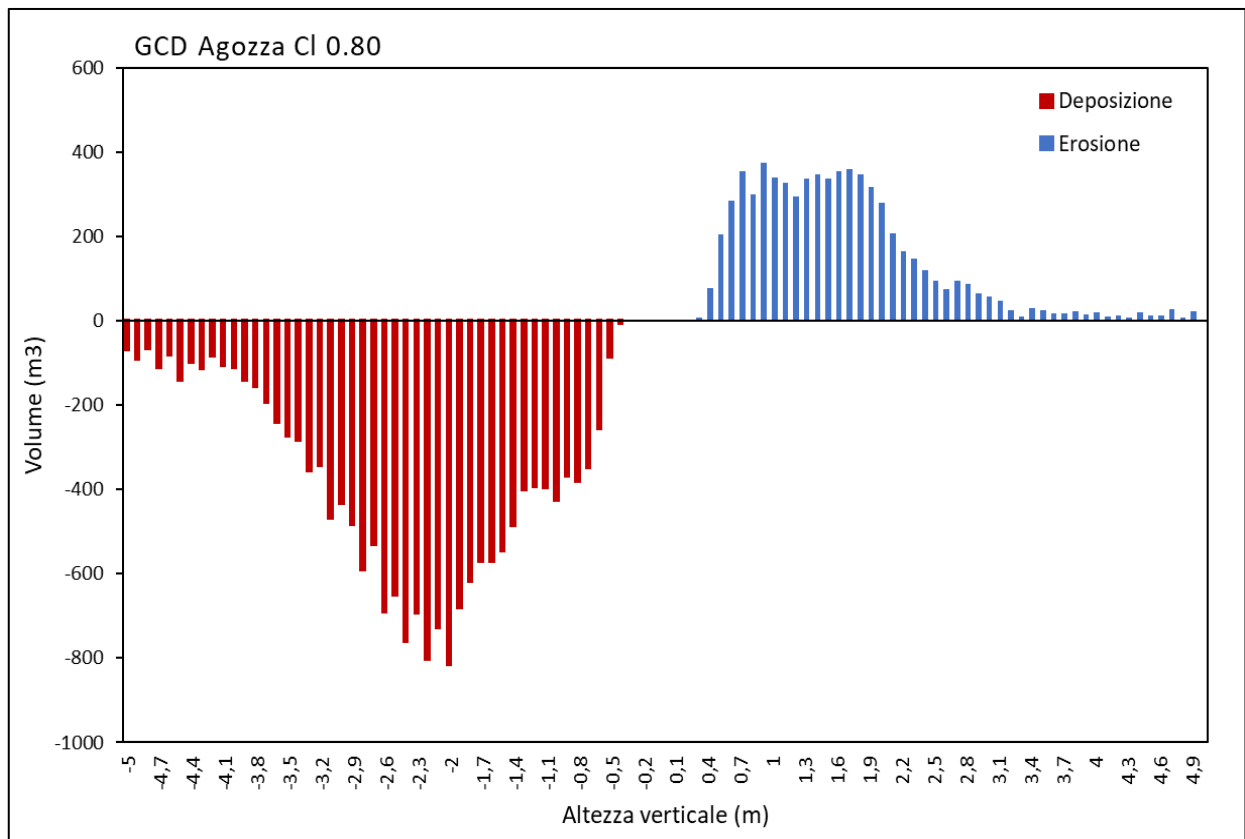


Fig. 25 Erosione e deposizione all'interno del canale principale del Rio Agozza.

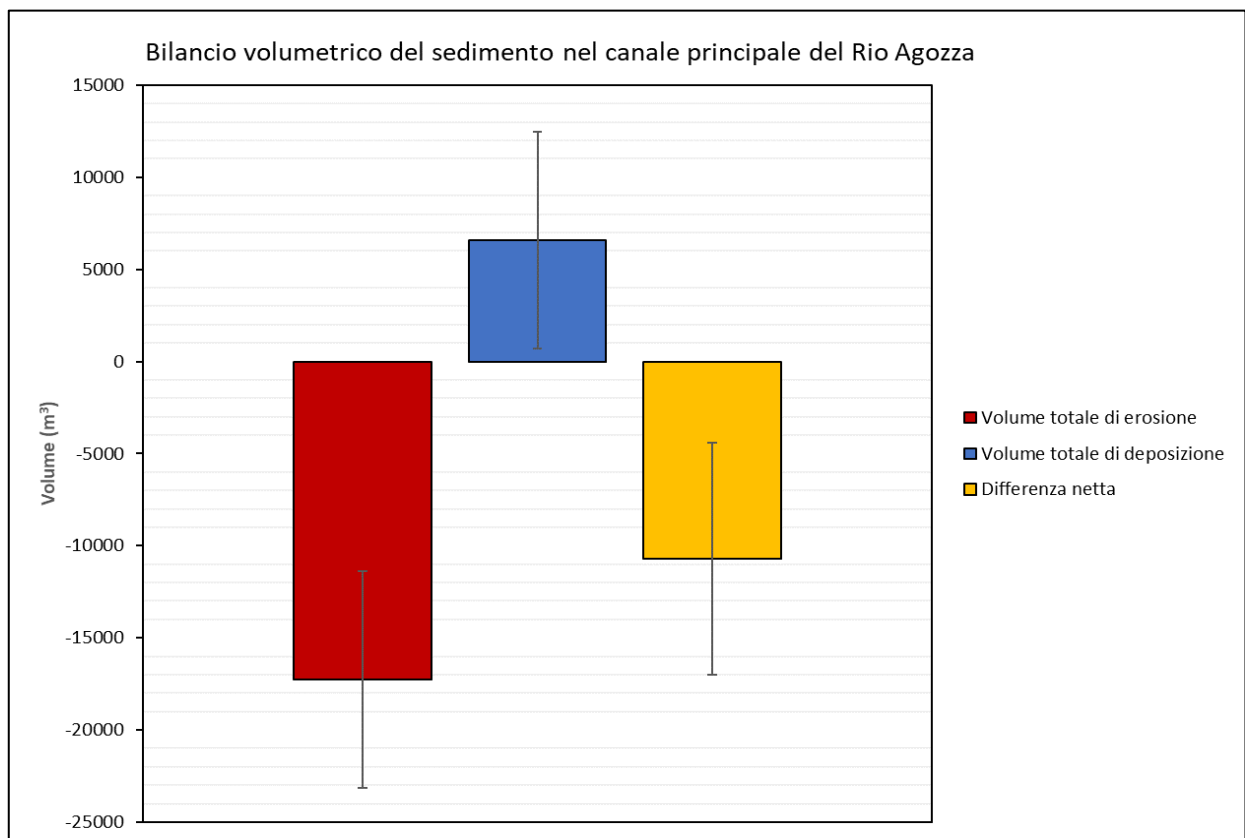


Fig. 26 Bilancio volumetrico del sedimento nel canale principale del Rio Agozza.

### 4.2.2.1 Tratti esaminati

L'analisi DoD relativa al tratto in esame (Fig. 27) restituisce un dato volumetrico di deposizione pari a  $2526 \pm 752 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $2844 \pm 928 \text{ m}^3$  con un netto di  $-317,66 \pm 1195,42 \text{ m}^3$ . L'altezza media verticale sulla superficie di deposizione è pari a  $1,37 \pm 0,41$  e di erosione pari a  $1,70 \pm 0,55 \text{ m}$ .

In prossimità della soglia Agozza\_4 si evidenzia una zona di deposizione subito a monte ed una chiara erosione della sponda destra, facilmente riscontrabili dalle ortofoto. A seguito della manutenzione straordinaria (post-Vaia) delle opere, l'analisi di campo mostra come tale soglia sia ancora caratterizzata da marcata deposizione, per la quale la sua funzionalità risulta compromessa. Le soglie Agozza\_5, Agozza\_6, Agozza\_7 (Fig. 28; B; C; D; E), sono interessate da erosione a monte e a valle da analisi DoD (Fig. 28A) infatti la loro funzionalità è compromessa in quanto risultano sottoscavate ad eccezione della soglia 5 (Fig. 28C) la cui funzionalità risulta buona. La zona a valle della briglia Agozza\_8 (Fig. 28F) evidenzia una marcata erosione in sinistra idrografica che trova riscontro negativo nelle analisi di campo, in quanto la funzionalità risulta operativa.

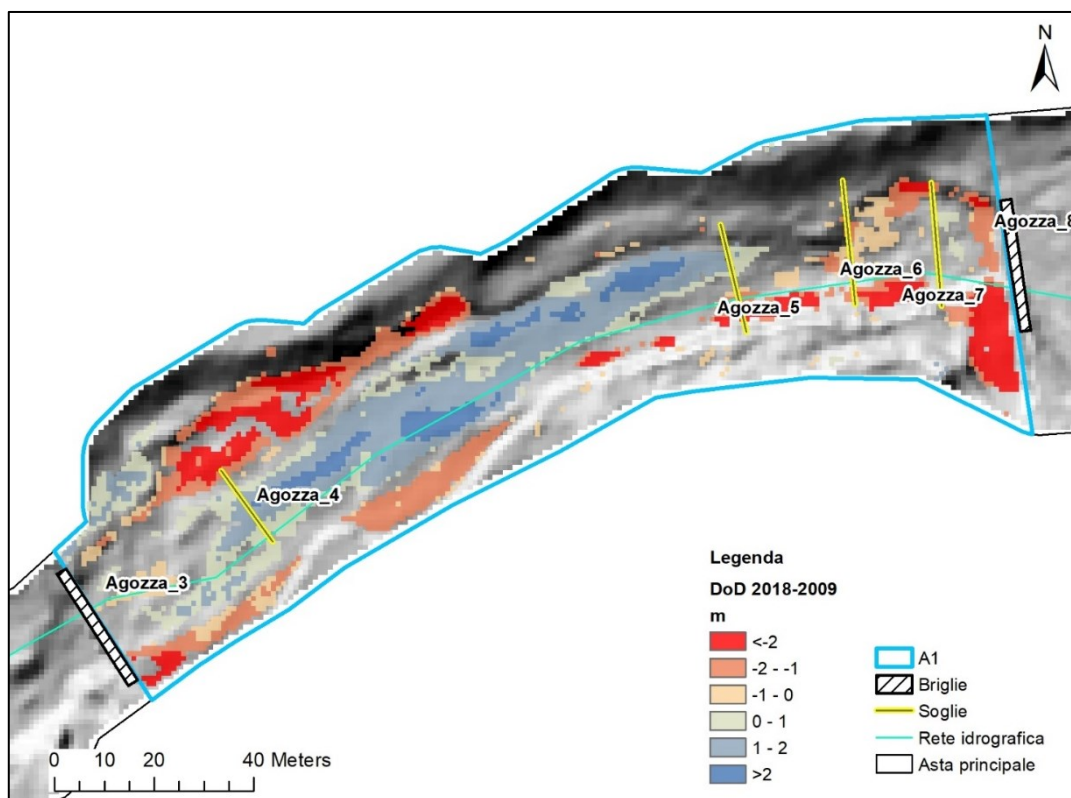


Fig. 27 DoD tratto A1 Rio Agozza



Fig. 28 A) Briglia Agozza\_8 e soglie Agozza\_7-6-5; B) Soglia Agozza\_4; C) Soglia Agozza\_5; D) Soglia Agozza\_6; E) Soglia Agozza-7; F) Briglia Agozza\_8.

I dati relativi a volume di sedimento ricavati da analisi DoD 2018-2009 per il tratto A2 in esame (Fig. 29) riportano valori di deposizione pari a  $420 \pm 160 \text{ m}^3$  e di erosione pari a  $6113 \pm 1682 \text{ m}^3$  con un netto di  $-5693,46 \pm 1690,53 \text{ m}^3$ . I valori di altezza media verticale sulla superficie di deposizione sono pari a  $0,86 \pm 0,33 \text{ m}$  e di erosione di  $2,10 \pm 0,58 \text{ m}$ .

A monte della briglia Agozza\_12 (Fig. 30A) da analisi DoD (Fig. 29) è visibile una zona di erosione in sinistra idrografica, informazione non riscontrata in campo ma da ortofoto ma comunque non



sufficiente da poter compromettere la funzionalità della briglia, che risulta, ad oggi, operativa. A valle della briglia F-10675-2-5 (Fig. 30A) da analisi DoD è evidente un'area di erosione marcata in destra idrografica e a monte una zona di deposizione. Confrontando le figure C e D (Fig. 30) si nota l'erosione spondale in destra idrografica con la presenza di individui arborei reclutati all'interno del canale principale. Inoltre, le analisi di campo individuano a monte della briglia F-10675-2-5 la presenza di vegetazione e di materiale legnoso depositato in alveo, indicatori di una condizione di marcata deposizione per la quale la funzionalità risulta essere compromessa.

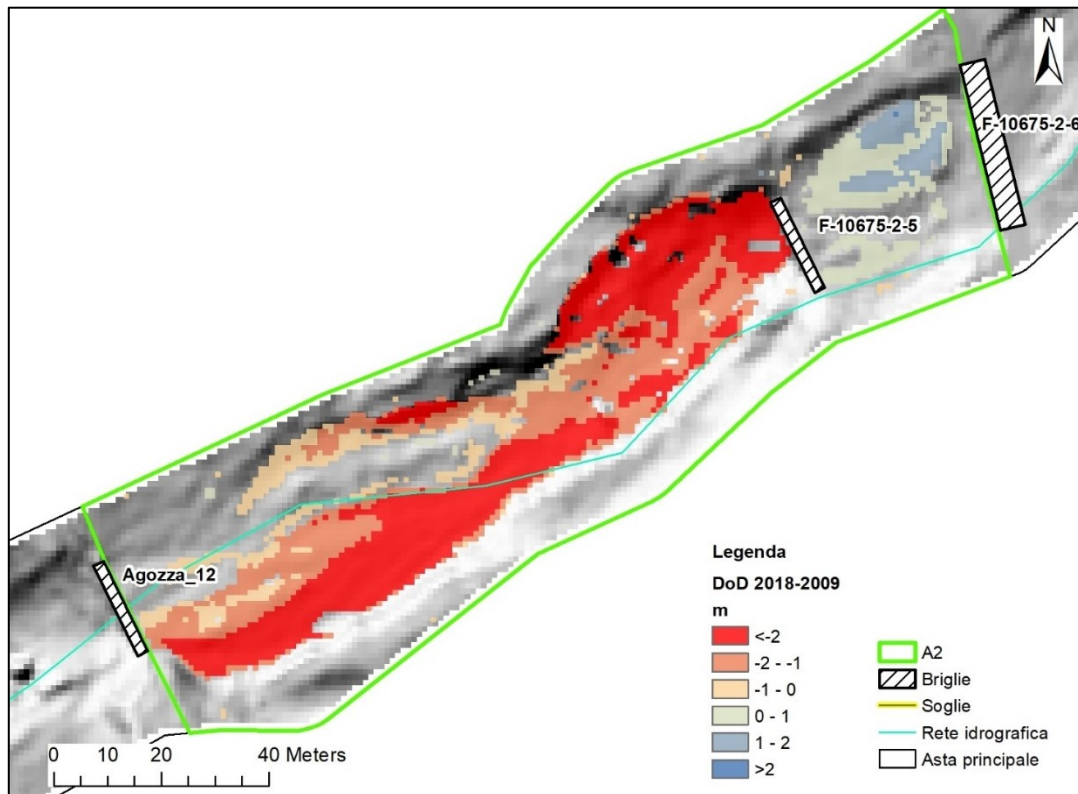


Fig. 29 DoD tratto A2 Rio Agozza



Fig. 30 A) Briglia Agozza\_12; B) Zona a monte della briglia Agozza\_12; C) Briglia F-10675-2-5; D) Briglia F-10675-2-5 e guado F-10675-2-6.

## 5 DISCUSSIONI

Dai dati LiDAR si sono ricavati i modelli digitali del terreno grazie ai quali si sono effettuate le analisi DoD per i bacini del Rio Miozza e del Rio Agozza. Entrambi i bacini sono caratterizzati per la predisposizione al trasporto solido e a fenomeni di colata detritica. Per contrastare tali fenomeni, i bacini presentano un impianto sistematorio costituito da molte opere: il bacino del Rio Miozza presenta 34 opere trasversali e il bacino del Rio Agozza 23. Le successive analisi di campo hanno definito la condizione e la funzionalità idraulica attuale delle opere stesse. L'applicazione dell'approccio DoD ha permesso la caratterizzazione dei fenomeni erosivi e deposizionali, nonché le relative quantificazioni volumetriche di queste dinamiche, come riportato nello studio effettuato da Cucchiaro et al. (2019).

Per quanto riguarda il bacino del Rio Miozza, la deposizione maggiore in termini di superficie è localizzata nel punto di confluenza tra il Rio d'Archia e il Rio Miozza, mentre l'erosione si riscontra a quote più elevate e a maggior pendenza. Il bilancio volumetrico del sedimento (Fig.17) evidenzia

la prevalente deposizione rispetto all'erosione. Il sedimento proviene dalla zona di testata del bacino dove è presente una nicchia di distacco di una paleofrana, dai versanti e da canali colluviali in destra e in sinistra idrografica. Tale tendenza riscontrata nel Miozza è tipica dei bacini montani, in cui il sedimento viene tipicamente trasferito dalle zone di testata, dove si osservano aree sorgenti di sedimento, verso la rete di canali a valle, nella quale predomina la deposizione ed innalzamento del fondo (Burt & Allison, 2010). La suddivisione del canale principale in tratti ha permesso di ottenere un dettaglio dell'interazione tra le opere e le dinamiche di sedimento confrontando poi le analisi di campo. Il tratto M1 non riscontra particolari difformità tra analisi DoD e analisi in campo. La briglia F-11110-3-2\_bis presenta a valle di essa alcuni lobi di deposizione ed erosione, tale analisi di dettaglio, permette di individuare la localizzazione delle dinamiche di flussi di trasporto solido e liquido, dinamiche talvolta non visibili da analisi di campo ma riscontrabili in analisi DoD. Come definito da Victoriano et al. (2018), il DoD, restituisce un'analisi in dettaglio dei *pattern* erosivi e deposizionali che permette di svolgere monitoraggio e interventi mirati anche in corrispondenza di aree di bacino dove l'accesso è difficoltoso. La briglia F-11110-3-2\_bis, precedentemente citata, è inoltre sifonata e presenta eccessiva deposizione a monte (riscontrabile solo da analisi di campo) con materiale legnoso reclutato all'interno dell'alveo dai versanti. Tale condizione può causare il crollo della briglia (Lucas-Borja et al., 2021) e la presenza di materiale legnoso in alveo può implementare la volumetria del trasporto solido durante le piene e la formazione di barriere temporanee. Queste barriere (*large wood*), condizionano il regime del deflusso durante la piena creando un blocco temporaneo che a seguito del suo collasso genererà un flusso di piena improvviso (*dam break*) (Mao et al., 2013). La condizione di aumento del volume di trasporto solido e la generazione di flussi di piena improvvisa può potenzialmente provocare danni alle opere di sistemazione idraulico-forestali o la distruzione delle stesse se già si trovano in condizioni di funzionalità compromessa e stato danneggiato. La presenza di vegetazione arborea in prossimità del canale principale accompagnata da erosione spondale marcata, canali colluviali e fenomeni franosi dai versanti boscati implementano la presenza di materiale legnoso in alveo. Tali caratteristiche, associate alla presenza di insediamenti urbani a valle, suggeriscono di considerare l'inserimento nel complesso sistematorio di opere per il controllo del materiale legnoso (Mao et al., 2013).

Il tratto M2 presenta delle incongruenze tra il risultato dell'analisi DoD e le analisi di campo. Tale discrepanza è probabilmente attribuibile ai fenomeni di trasporto solido avvenuti nell'intervallo di tempo intercorso tra il rilievo LiDAR (2018) e il rilievo in campo (2022). È pertanto necessaria una continua raccolta di dati HRT e di analisi di campo per eseguire un monitoraggio costante, e intervenire tempestivamente sia a livello di singola opera che a livello di bacino, in quanto, come

dimostrato in questa tesi le dinamiche all'interno del sistema bacino variano in modo piuttosto repentino.

Salendo di quota, in corrispondenza del tratto M3, le analisi DoD individuano una marcata erosione, non riscontrata da analisi di campo. In questo caso particolare la briglia F-11110-9-1\_quater è sottoscavata a valle a causa dell'energia dissipata dalla caduta libera dell'acqua (Lenzi & Comiti, 2003) o per le naturali fluttuazioni del sedimento ai piedi delle briglie (Theule et al., 2015). Tale tratto è importante in quanto le opere qui localizzate reclutano il sedimento proveniente direttamente dalla testata del bacino e condizionano in tal modo la sistemazione a valle.

L'intero canale del Rio Miozza presenta solamente 5 opere (15%) la cui funzionalità è operativa e lo stato è buono, il restante è danneggiato e la loro funzionalità è compromessa. Il complesso ci suggerisce che il bacino è soggetto a dinamiche importate, date le differenze tra analisi DoD (2018-2009) e le analisi in campo del 2022. Secondo quanto definito da Mazzorana et al., (2014) ovvero che la suscettibilità di una singola opera può compromettere l'intero sistema, possiamo ritenere che le opere del bacino del Rio Miozza necessitano di manutenzione, soprattutto per quanto concerne la funzionalità nella gestione del sedimento dovuta all'eccessiva deposizione.

Per quanto concerne il bacino del Rio Agozza, il bilancio volumetrico (Fig. 26) complessivo individua erosione prevalente. Nel dettaglio, il tratto A2 è caratterizzato da erosione, mentre più a valle, è prevalente la deposizione. Il tratto da A1 alla sezione di chiusura è stato sistemato nel 2020. L'intervento ha previsto la sistemazione delle opere esistenti, la costruzione di opere spondali e soglie, per tale motivo, le analisi di campo riflettono una situazione a due anni dalla sistemazione. Si è dunque confrontato, attraverso l'analisi DoD, lo stato precedente la sistemazione con lo stato ad oggi. A due anni dalla loro costruzione le soglie (ad eccezione della soglia Agozza\_5) risultano sottoscavate e con necessità manutentiva. Da analisi DoD, esse sono state localizzate in corrispondenza di un tratto che evidenziava erosione dimostrando dunque che, la localizzazione delle soglie è adeguata, contrariamente alla modalità di costruzione. Da analisi DoD, a valle della briglia Agozza\_8 è evidente una marcata erosione in sinistra idrografica, sistemata a seguito della costruzione dell'opera spondale. Lungo il tratto A2 è prevalente l'erosione, confermata anche da analisi di campo. La sponda di destra, in particolare, è marcatamente erosa e ciò ha causato il reclutamento all'interno dell'alveo di alcuni individui arborei. Sarebbe dunque opportuno provvedere ad un'opera di stabilizzazione spondale per questo tratto, e ad una manutenzione della briglia F-10675-2-5 la quale risulta sovralluvionata con la presenza di vegetazione arborea ed arbustiva in alveo. La condizione di sovralluvionamento, come riportato nello studio di Lucas-Borja et al., (2021) può creare degli stock di sostanza organica e, in condizioni di moderato disturbo, contribuire

all'insediamento della vegetazione. In questo caso, data la presenza di elementi esposti in prossimità del corso d'acqua la vegetazione in alveo può risultare pericolosa. Il torrente, infatti, scorre in prossimità di insediamenti urbani e la principale necessità è quella di favorire il rapido deflusso.

Monitorare nel tempo le opere di sistemazione anche attraverso HRT è importante per intervenire in modo prioritario dove il funzionamento delle stesse risulta inadeguato o nullo ai fini della mitigazione del rischio idrogeologico (Lucas-Borja et al., 2021).

## 6 CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi mirava a valutare il funzionamento delle opere di sistemazione idraulico-forestali e del loro ruolo nelle dinamiche del sedimento all'interno di due bacini montani localizzati nelle alpi orientali italiane (Rio Agozza e Rio Miozza, UD, Friuli Venezia Giulia), combinando analisi di campo con la metodologia del "DEM of Difference" (DoD). Le analisi DoD tra 2009 e il 2018 hanno fornito indicazioni dettagliate riguardo le dinamiche erosive e deposizionali all'interno del canale principale dei bacini oggetto di studio e relative alla funzionalità alle opere di sistemazione dei due bacini. Comparando quanto emerso dall'analisi DoD con i dati raccolti mediante rilievi di campo è stato possibile valutare solo parzialmente i risultati, in quanto i dati LiDAR più recenti a disposizione (2018) sono di molto antecedenti ai dati rilevati in campo (2022). Questo ha tuttavia reso possibile apprezzare la rapidità con cui le dinamiche del sedimento si verificano e l'evoluzione dei processi erosivi e di deposizione evidenziati dall'analisi DoD. Le informazioni ottenute dalle analisi DoD possono quindi essere un utile strumento di supporto per la programmazione di interventi mirati al mantenimento della funzionalità delle opere di sistemazione. Tuttavia, avere a disposizione dati il più possibile aggiornati risulta fondamentale per riuscire a valutare l'attuale funzionamento delle opere di sistemazione idraulico. Una buona funzionalità può essere mantenuta nel lungo periodo svolgendo interventi di manutenzione finalizzati al mantenimento dell'integrità strutturale. La metodologia DoD permette anche di ricavare i dati dei volumi di sedimento mobilizzato a diversi livelli di scala importanti ai fini della progettazione. L'applicazione di tale metodologia non è comunque risultata universale ma necessita delle opportune calibrazioni sulle caratteristiche di ogni bacino. I rilievi LiDAR sono una tecnologia con la quale è possibile ricavare dati dettagliati grazie ai quali è possibile svolgere interventi mirati, avendo comunque a disposizione un quadro completo a larga scala. Questo lavoro di tesi ha evidenziato attraverso l'analisi multi-temporale tra 2009 e il 2018 e il confronto con lo stato attuale ha evidenziato

come le dinamiche all'interno dei bacini montani siano soggette a cambiamenti repentini e la conseguente necessità di avere a disposizione dati sempre aggiornati al fine di poter valutare al meglio lo stato di manutenzione e la funzionalità delle opere di sistemazione idraulico-forestali.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- ArpaFVG-Meteo (2014). Il Clima del Friuli Venezia Giulia.
- Aulitzky H. (1973). *Vorläufige Wildbach-GefährlichkeitsKlassifikation für Schwemmkege*. 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Band IV, Teil 2, pp. 81-113.
- Aulitzky H. (1982). *Preliminary two-fold classification of torrents*. Mitt. der Forst. Bundesversuchsanstalt, Heft 144: 243-256.
- Brasington, J., Rumsby, B. T. , & McVey, R. A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973–990.
- Burt, T. P., & Allison, R. J. (2010). *Sediment Cascades: An Integrated Approach*. (Chichester: Wiley.).
- Cavalli, M., & Marchi, L. (2008). Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. In *Hazards Earth Syst. Sci* (Vol. 8).
- Cavalli, M., & Tarolli, P. (2011). Applicazione Della Tecnologia LIDAR Per Lo Studio Dei Corsi D'acqua. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2011 SPECIALISSUE.1, 33–44.
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., & Dalla Fontana, G. (2008). The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *Catena*, 73(3), 249–260.
- Charlton, M. E., Large, A. R. G., & Fuller, I. C. (2003). Application of airborne lidar in river environments: The River Coquet, Northumberland, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 299–306.
- Cucchiario, S., Cazorzi, F., Marchi, L., Crema, S., Beinat, A., & Cavalli, M. (2019). Multi-temporal analysis of the role of check dams in a debris-flow channel: Linking structural and functional connectivity. *Geomorphology*, 345.
- D'Agostino, V. (2021). *Materiale didattico del corso «Fluviomorfologia e protezione dal rischio idrogeologico» A.A. 2021-2022. Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.*
- Dalla Fontana, G. (2014). *Materiale didattico del corso «Idrologia e Sistemazioni Idraulico-Forestali» A.A. 2013-2014. Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.*

- Fortugno, D., Boix-Fayos, C., Bombino, G., Denisi, P., Quiñonero Rubio, J. M., Tamburino, V., & Zema, D. A. (2017). Adjustments in channel morphology due to land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2469–2483.
- Fryirs, K. (2012). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30–46.
- Huebl, J., Fiebiger, G. (2005). *Debris-flow mitigation measures*. In: *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*- Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. In *Landslides* (Vol. 11, Numero 2, pagg. 167–194). Springer Verlag.
- IRDAT. (2018). <http://irdat.regione.fvg.it/WebGIS/>.
- Lane, S. N., Westaway, R. M., & Hicks, D. M. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 249–271.
- Lenzi, M. A., & Comiti, F. (2003). Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences. *Geomorphology*, 55(1–4), 97–109.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. In *Progress in Physical Geography* (Vol. 32, Numero 1, pag. 31–49). SAGE Publications Ltd.
- Lucas-Borja, M. E., Piton, G., Yu, Y., Castillo, C., & Antonio Zema, D. (2021). Check dams worldwide: Objectives, functions, effectiveness and undesired effects. In *Catena* (Vol. 204). Elsevier B.V.
- Major, J. J. (1996). *Experimental Studies of Deposition of Debris Flows: Process, Characteristics of Deposits, and Effects of Pore-Fluid Pressure*. Ph.d.
- Mao, L., Andreoli, A., Iroumé, A., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2013). Dinámica y alternativas de manejo de material leñoso de gran tamaño en cuencas del sur de Los Andes. *Bosque*, 34(3), 319–330.
- Marchi, L., Comiti, F., Crema, S., & Cavalli, M. (2019). Channel control works and sediment connectivity in the European Alps. *Science of the Total Environment*, 668, 389–399.



- Mazzorana, B., Trenkwalder-Platzer, H. J., Fuchs, S., & Hübl, J. (2014). The susceptibility of consolidation check dams as a key factor for maintenance planning. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66(5–6), 214–216.
- Meunier, M. (1991). *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Quae.
- Montgomery, D.R & Buffington J. M. (1977). *Channel-reach morphology in mountain basins*. Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle, Washington 98195.
- Osservatorio, S., & Regionale, M. *Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia Atlante climatico del Friuli Venezia Giulia 1. Precipitazioni Documento riassuntivo Studio a cura di Andrea Cicogna ARPA-Osmer Visco (UD) ottobre 2008*. [www.meteo.fvg.it](http://www.meteo.fvg.it)
- Phillips, J. (2003). *Alluvial storage and the long-term stability of sediment yields*.
- Piton, G., Carlados, S., Recking, A., Tacnet, J. M., Liébault, F., Kuss, D., Quefféléan, Y., & Marco, O. (2017). Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 91–108.
- Piton, G., & Recking, A. (2017). Effects of check dams on bed-load transport and steep-slope stream morphodynamics. *Geomorphology*, 291, 94–105.
- Polat, N., & Uysal, M. (2015a). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 63, 61–68.
- Polat, N., & Uysal, M. (2015b). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 63, 61–68.
- Protezione Civile, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. <https://www.protezionecivile.fvg.it/it/node/139>
- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia Direzione centrale risorse agricole, naturali, forestali e montagna La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK. (2015).
- Slatton, K. C., Carter, W. E., Shrestha, R. L., & Dietrich, W. (2007). Airborne Laser Swath Mapping: Achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. *Geophysical Research Letters*, 34(23).

- Sofia, G., Tarolli, P., Cazorzi, F., & Dalla Fontana, G. (2012). *Impiego di DTM ad alta risoluzione per la misura automatica di larghezze al bankfull High Resolution DTMs for the automatic measurement of bankfull widths.*
- Tamotsu Takahashi. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Annual Review of Fluid Mechanics (Vol. 13).*
- Theule, J. I., Liébault, F., Laigle, D., Loye, A., & Jaboyedoff, M. (2015). Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology*, 243, 92–105.
- Vandine, D. F. (1996). *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering.*
- Victoriano, A., Brasington, J., Guinau, M., Furdada, G., Cabré, M., & Moysset, M. (2018). Geomorphic impact and assessment of flexible barriers using multi-temporal LiDAR data: The Portainé mountain catchment (Pyrenees). *Engineering Geology*, 237, 168–180.
- Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. (Great Britain). In *Journal of Hydrology* (Vol. 65).
- Wheaton, J. M. (2008). *Uncertainty in Morphological Sediment Budgeting of Rivers.* Unpublished PhD Thesis, University of Southampton, Southampton, 412 pp.
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156.
- Zema, D. A., Bombino, G., Boix-Fayos, C., Tamburino, V., Zimbone, S. M., & Fortugno, D. (2014). Evaluation and modeling of scouring and sedimentation around check dams in a Mediterranean torrent in Calabria, Italy. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(4), 316–329.
- Zema, D. A., Bombino, G., Denisi, P., Lucas-Borja, M. E., & Zimbone, S. M. (2018). Evaluating the effects of check dams on channel geometry, bed sediment size and riparian vegetation in Mediterranean mountain torrents. *Science of the Total Environment*, 642, 327–340.