



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**



**Dottorato di Ricerca Interateneo in
Ingegneria Civile–Ambientale e Architettura**

Curriculum: Ingegneria

Settore Scientifico Disciplinare: CEAR-04/A

XXXVII Ciclo

**MONITORAGGIO DELLE DINAMICHE SPONDALI DEL
BASSO TAGLIAMENTO NEL TRATTO DI RONCHIS (UD)
MEDIANTE FOTOGRAMMETRIA UAV
MULTISPETTRALE E CHANGE DETECTION
GEOMATICA**

Dottorando
ANDREA MARTINO

Coordinatore
Prof. **ALBERTO SDEGNO**

Supervisore di Tesi
Prof.ssa **CATERINA BALLETTI**

Co-Supervisore di Tesi
Prof. **ALBERTO BEINAT**

Anno Accademico 2023/2024



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**



**Dottorato di Ricerca Interateneo in
Ingegneria Civile–Ambientale e Architettura**

Curriculum: Ingegneria

Settore Scientifico Disciplinare: CEAR-04/A

XXXVII Ciclo

**MONITORAGGIO DELLE DINAMICHE SPONDALI DEL
BASSO TAGLIAMENTO NEL TRATTO DI RONCHIS (UD)
MEDIANTE FOTOGRAMMETRIA UAV
MULTISPETTRALE E CHANGE DETECTION
GEOMATICA**

Dottorando
ANDREA MARTINO

Coordinatore
Prof. ALBERTO SDEGNO

Supervisore di Tesi
Prof.ssa CATERINA BALLETTI

Co-Supervisore di Tesi
Prof. ALBERTO BEINAT

Anno Accademico 2023/2024

Riassunto

I corsi d'acqua naturali sono sistemi in continua evoluzione, soggetti a processi di erosione e deposizione che ridisegnano costantemente le sponde e l'alveo. Monitorare queste dinamiche spondali è fondamentale sia per comprendere l'evoluzione degli ecosistemi fluviali sia per gestire i rischi idrogeologici, specialmente alla luce dei cambiamenti climatici e delle pressioni antropiche. Eventi di piena sempre più frequenti e intensi possono accelerare l'erosione delle sponde e modificare la vegetazione riparia, mentre interventi antropici (dighe, estrazioni di inerti, opere di difesa) hanno spesso ridotto la naturale mobilità degli alvei. In questo contesto diventa cruciale disporre di metodi efficaci per quantificare i cambiamenti morfologici su scale spazio-temporali adeguate.

Le tecniche tradizionali di rilievo fluviale (livellazioni topografiche, foto aeree storiche, ecc.) presentano tuttavia limiti significativi in termini di risoluzione, estensione e frequenza di osservazione. Negli ultimi anni, l'adozione di nuove tecnologie geomatiche ha rivoluzionato il monitoraggio fluviale, consentendo di superare molte di queste limitazioni. In particolare, l'impiego di droni (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) equipaggiati con sensori fotogrammetrici ad alta risoluzione e multispettrali, insieme a dati satellitari multispettrali (come Sentinel-2) e radar (Sentinel-1), permette oggi di ottenere modelli digitali del terreno, ortofoto dettagliate e indici spettrali con cadenze ravvicinate e a costi contenuti. Questi strumenti offrono una copertura spaziale continua e una precisione centimetrica prima impensabile, rendendo possibile il rilevamento anche di cambiamenti morfologici minimi subito dopo gli eventi di piena.

La presente tesi si colloca in questo scenario e ha l'obiettivo di monitorare le dinamiche spondali del basso corso del fiume Tagliamento, in corrispondenza del comune di Ronchis (UD), mediante fotogrammetria multispettrale da UAV integrata con tecniche di *change detection*. L'approccio adottato combina rilievi aerofotogrammetrici ad alta risoluzione con l'analisi di dati regionali pregressi e immagini satellitari, al fine di quantificare sia le modifiche morfologiche dell'alveo (erosioni, deposizioni, traslazioni laterali) sia la risposta della vegetazione riparia a una serie di eventi di piena recenti. Si tratta di uno studio interdisciplinare che unisce aspetti geomorfologici (variazioni topografiche, volumi erosi) e aspetti ecologici (cambiamenti nella copertura vegetale e nell'estensione delle aree umide), offrendo una visione integrata dell'evoluzione recente di questo sistema fluviale.

L'area di studio si trova nel basso Tagliamento, un fiume del Nord-Est italiano noto per il suo elevato valore ambientale e per la dinamica morfologica relativamente naturale. Nel tratto di Ronchis il fiume presenta un alveo meandriforme, ancora soggetto a processi attivi di migrazione laterale e di interazione tra flusso, sedimenti e vegetazione. Sono stati selezionati sette siti di monitoraggio lungo questo tratto (denominati TF01–TF07), corrispondenti ad anse e porzioni di alveo ritenute vulnerabili all'erosione spondale. Questi siti rappresentano un campione significativo delle condizioni morfologiche locali e delle dinamiche in atto, comprendendo sia aree già interessate da modifiche recenti sia zone relativamente stabili.

Nel biennio 2023-2025 sono state condotte più campagne di rilievo con un UAV dotato di camere multispettrali, ottenendo dati con GSD (*Ground Sample Distance*) di 2 cm. La pianificazione dei voli e la georeferenziazione delle immagini con ricevitori GNSS in modalità nRTK e punti di controllo a terra hanno garantito un'elevata accuratezza. Dai rilievi sono state generate nuvole di punti ad alta densità, modelli digitali di elevazione (DSM) e ortofoto georeferenziate sia a colori reali (RGB) sia nelle bande multispettrali, da cui sono stati derivati indici come NDVI e NDWI. Tali prodotti ad altissima risoluzione costituiscono la base per il confronto multitemporale e la quantificazione dettagliata delle variazioni morfologiche.

Per estendere l'analisi temporale oltre i rilievi UAV, sono state utilizzate ortofoto regionali del 2017-2020 per ricostruire la situazione precedente, e immagini multispettrali Sentinel-2 dal 2018 al 2025 per monitorare gli indici di vegetazione. Le immagini radar Sentinel-1 sono state impiegate per mappare l'estensione delle inondazioni in occasione di alcuni grandi eventi di piena.

L'analisi ha previsto il confronto quantitativo tra modelli 3D di epoche successive (*cloud-to-cloud*, differenze di DSM) per misurare l'entità e la distribuzione dei fenomeni erosivi, l'estrazione di indici come NDVI e NDWI per valutare gli effetti su vegetazione e acque superficiali, e l'esame di serie temporali multispettrali per individuare le variazioni indotte dalle piene a scala stagionale e interannuale. In particolare, sono stati analizzati nove eventi di piena tra settembre 2023 e marzo 2025, correlando i dati idrometrici con le variazioni degli indici spettrali, così da individuare tempestivamente gli effetti di ciascuna piena sul sistema ripariale. La sinergia tra dati da drone e da satellite ha permesso di ottenere una visione d'insieme continua, colmando le lacune di ciascuna fonte presa singolarmente.

I risultati evidenziano la marcata dinamicità del basso Tagliamento e l'utilità dell'approccio multiscala adottato. Nel periodo 2023-2025, diverse sponde del fiume hanno subito arretramenti significativi: in corrispondenza di anse attive si sono misurati spostamenti laterali e volumi erosivi notevoli, indicando una rilevante mobilità dell'alveo. Al contrario, altre porzioni di riva sono rimaste quasi inalterate, a conferma dell'eterogeneità spaziale tipica di questi sistemi: l'erosione si concentra in settori circoscritti, mentre altrove il fiume resta stabile. Anche piene di moderata entità hanno prodotto cambiamenti morfologici rilevabili, segno di un alveo altamente sensibile e pronto a rimodellarsi anche in assenza di eventi estremi.

Gli indici di vegetazione hanno rivelato una rapida risposta della fascia riparia alle piene. Subito dopo gli eventi si registra un netto calo dell'NDVI nelle zone inondate, indicativo di perdita di copertura vegetale per erosione o sommersione. In molti casi l'area ad alta densità vegetale (alto NDVI) si contrae nel post-piena, mentre aumentano le superfici a basso NDVI; nei mesi successivi, poi, l'NDVI torna gradualmente a salire con la ricrescita della vegetazione, segnalando la resilienza del sistema. L'NDWI ha confermato l'estensione delle aree allagate. Incrociando i dati spettrali con quelli fotogrammetrici si coglie chiaramente il nesso tra processi fisici ed effetti ecologici: dove l'erosione asporta sedimenti, la copertura vegetale si riduce drasticamente, per poi ricolonizzare gradualmente le aree liberate.

La comparazione tra i dati UAV e quelli satellitari ha confermato il carattere complementare delle due fonti. Da un lato, le ortofoto da drone, con una risoluzione di 2-3 cm/pixel, permettono di rilevare variazioni di NDVI a scala di singola chioma, mentre Sentinel-2, con risoluzione minima di 10 m/pixel (100 m² per pixel), appiattisce tali massimi locali, restituendo valori mediati sull'intera area del pixel; dall'altro, il satellite permette un monitoraggio continuo su tutto il corso d'acqua, riuscendo a rilevare le principali variazioni areali e indicando le zone critiche da investigare in dettaglio. Anche Sentinel-1 si è rivelato prezioso, poiché le immagini radar permettono di mappare le estensioni delle inondazioni indipendentemente dalla copertura nuvolosa, fornendo un ulteriore livello informativo sui fenomeni osservati.

In conclusione, il lavoro svolto dimostra la fattibilità e l'utilità di un monitoraggio integrato multiscala delle dinamiche fluviali in un contesto di bacino di medie dimensioni. L'approccio combinato, unendo fotogrammetria da drone, indici multispettrali e dati satellitari, ha offerto una visione integrale dei processi in atto nel basso Tagliamento, rappresentando un esempio innovativo di integrazione tra analisi geomorfologica 3D e monitoraggio ecologico. I risultati forniscono conoscenze inedite sulla recente evoluzione del fiume e producono strumenti utili per la gestione: ad esempio, le mappe di erosione elaborate possono supportare la pianificazione di interventi nelle aree più instabili. La metodologia proposta è generale e replicabile, potendo fungere da modello per sistemi di monitoraggio avanzati su altri corsi d'acqua. Ulteriori sviluppi potranno riguardare l'impiego di sensori ancora più sofisticati (camere iperspettrali, termiche) e l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale per automatizzare le analisi, incrementando l'efficienza del monitoraggio. Questa esperienza evidenzia come le nuove tecnologie geomatiche offrano strumenti potenti per comprendere e gestire meglio i sistemi fluviali, aiutando ad affrontare con maggiore consapevolezza le sfide poste dal clima che cambia e dalle pressioni antropiche lungo i corsi d'acqua.

Indice

Riassunto.....	2
Indice.....	4
Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	7
Indice delle equazioni	8
Lista degli acronimi	9
1. Introduzione	10
1.1. Dinamiche fluviali, cambiamenti climatici e pressioni antropiche	10
1.2. Limiti dei metodi tradizionali e innovazioni delle tecniche geomatiche	12
1.3. Indicatori geomorfologici e vegetazionali monitorabili e metriche di <i>change detection</i>	15
1.4. Valore della combinazione di fonti dati: integrazione UAV, dati regionali e satellitari	18
1.5. Motivazioni scientifiche, ambientali e gestionali della ricerca.....	20
2. Stato dell'arte del monitoraggio fluviale con tecniche geomatiche	22
2.1. Evoluzione delle tecniche di rilievo ad alta risoluzione: fotogrammetria, SfM e LiDAR	22
2.2. Rilievo multispettrale e radar: contributi satellitari	24
2.3. Metodi di <i>change detection</i> fluviale.....	25
2.3.1. Differenza di DSM (DoD) e analisi di incertezza	25
2.3.2. Confronto di nuvole di punti (C2C e M3C2).....	25
2.3.3. <i>Change detection</i> radiometrico (ortofoto, NDVI, classificazioni)	26
3. Area di studio	29
3.1. Il fiume Tagliamento: un fiume intrecciato di elevato valore ambientale e morfodinamico	29
3.2. Caratteristiche geomorfologiche del tratto di Ronchis (UD).....	31
3.3. I siti di monitoraggio (TF01–TF07): criteri di selezione, morfologia e vulnerabilità	33
4. Materiali e metodi	35
4.1. Rilievi UAV: pianificazione voli, sensore multispettrale, nRTK, rete CP	35
4.2. Elaborazione fotogrammetrica SfM: nuvola di punti, DEM, ortofoto	40
4.3. Classificazione automatica della nuvola di punti (acqua, terreno, vegetazione)	44
4.4. Analisi delle nuvole di punti.....	46
4.5. Analisi semplificata dei Modelli Digitali di Elevazione (DEM) e delle ortofoto.....	56
4.6. Analisi spettrale su ortofoto NDVI e NDWI	61
4.7. Analisi multispettrale con Sentinel-2: integrazione sinottica alle ortofoto UAV	64
4.8. Monitoraggio rapido degli effetti di nove piene (set 2023 – mar 2025) con dati idrometrici regionali e immagini Sentinel-2	67
4.9. Profili climatici stagionali (2018-2025) e telerilevamento Sentinel-2: un set di <i>reference</i> per la vegetazione ripariale	71
4.10. Mappatura di cinque eventi di piena (2018-2025) con Sentinel-1 SAR.....	73
5. Risultati e discussione	75
5.1. Risultati delle analisi tridimensionali da nuvole di punti	75
5.2. Risultati delle analisi multispettrali	80
5.3. Risultati dell'analisi Sentinel-1	88
6. Discussione	90
6.1. Analisi critica dei risultati alla luce della letteratura	90
6.2. Utilità operativa delle tecniche geomatiche per il monitoraggio dei bacini minori	93

6.3.	Estensioni possibili	96
6.4.	Linee guida per un sistema di monitoraggio UAV-satellite	98
7.	Conclusioni e prospettive.....	100
7.1.	Sintesi del contributo scientifico	100
7.2.	Limiti dello studio.....	101
7.3.	Sviluppi futuri: sensori <i>hyperspectral</i> , termografia, AI per la classificazione automatica, monitoraggi post-piena rapidi	103
	Bibliografia	105

Indice delle figure

Fig. 1. Da sinistra a destra: UAV, Sentinel-2 MSI, Sentinel-1 SAR	12
Fig. 2. Inquadramento geografico del fiume Tagliamento.....	29
Fig. 3. Inquadramento del tratto finale del Tagliamento.....	31
Fig. 4 . Inquadramento della macroarea e dei TF	33
Fig. 5. Area di volo sul portale D-Flight.....	35
Fig. 6. Piano di volo parziale eseguito sul TF05.....	36
Fig. 7 DJI-M3M, sensori, ricevitore nRTK, radiometro solare	37
Fig. 8. Pannello di calibrazione della riflettanza MicaSense Calibrated Reflectance Panel 2.....	37
Fig. 9. Disposizione dei CP nelle campagne di rilievo del TF03 e del TF05 in data 11/02/2025	38
Fig. 10. Il processo di calibrazione radiometrica su Agisoft Metashape	40
Fig. 11. Nuvole di punti e ortofoto in visualizzazione True Color, NDVI, NDWI	45
Fig. 12. Caso di arretramento spondale nell'epoca 2023-2025 del TF03 da uguale punto di vista....	47
Fig. 13. TF01, verifica dell'allineamento tra le nuvole di punti	48
Fig. 14. Classificazione della nuvola in base alle soglie NDVI.....	49
Fig. 15. Nuvola di punti in <i>Scalar Field</i> C2C su area di erosione TF07_2024-2025/Fotografia DJI-M3M della stessa area.....	51
Fig. 16. Sponda in arretramento sul TF05 tra il 2024 e il 2025	52
Fig. 17. Slices delle nuvole di punti del TF05 tra il 2024 e il 2025.....	53
Fig. 18. Visualizzazione del volume eroso in una porzione limitata del T04 tra il 2017-2020 e il 2023.....	55
Fig. 19. Differenza tra DSM riferite al TF03 2024-2025.....	57
Fig. 20. Confronto tra DSM e ortofoto 2024-2025	58
Fig. 21. TF03: confronti tra le ortofoto regionale 2017-2020 e le <i>breaklines</i> 2023, 2024, 2025 digitalizzate	59
Fig. 22. TF03-Due: ortofoto NDVI/NDWI ritagliata, ricodificazione	62
Fig. 23. TF07-Tre: indici NDVI e NDWI derivati dal DJI-M3M e da Sentinel-2.....	65
Fig. 24. Diagramma livello idrometrico-tempo delle 3 stazioni a novembre 2023	67
Fig. 25. Evento 01/04/2024-03/04/2024. Zone evidenziate dal Change Detection Wizard per gli indici NDVI ed NDWI.....	68
Fig. 26. Evento 27/09/2024-29/09/2024. NDVI pre-evento, NDVI post-evento, NDVI-differenziale	69
Fig. 27. Indici NDVI nel periodo Gennaio 2018-2025	72
Fig. 28. Fasi di elaborazione dei dati Sentinel-1 in SNAP	74
Fig. 29. TF03_2024/02-2025/02: erosione massima registrata tra due campagne di rilievo consecutive.....	76
Fig. 30. TF03_2024/02-2025/02: profilo planimetrico alla quota di 5,4 m	76
Fig. 31. TF03_2024/02-2025/02: profilo trasversale	77
Fig. 32. TF03_2024/02-2025/02: calcolo volumetrico	78
Fig. 33. Maschera NDWI estratta dal Change Detection Wizard sovrapposta alle immagini True Color ed NDWI pre-evento.....	84
Fig. 34. Evento novembre 2019: elaborazione dei dati radar Sentinel-1	88
Fig. 35. Aree allagate nell'evento del 2019 e del 2023 evidenziate in rosso.....	89

Indice delle tabelle

Tab. 1. Elenco dei rilievi aerofotogrammetrici eseguiti nel triennio 2023-2025	39
Tab. 2. Nuvole di punti e precisione rispetto ai centri di presa nRTK nell'orientamento assoluto ...	41
Tab. 3. Valori di precisione dei CP	42
Tab. 4. Intervalli NDVI adottati	49
Tab. 5. Intervalli NDVI	61
Tab. 6. Intervalli NDWI	61
Tab. 7. Tabella Idrometro-Evento_Latisana1/Madrisio	67
Tab. 8. Intervalli Δ NDVI	68
Tab. 9. Profilo climatico: temperature registrate dalla stazione di Codroipo espresse in C°	71
Tab. 10. I risultati dell'analisi C2C sui confronti effettuati	75
Tab. 11. Volume eroso nelle aree oggetto di analisi C2C	77
Tab. 12. Calcolo dell'accuratezza del volume	79
Tab. 13. DJI-M3M: valori areali NDVI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico	81
Tab. 14. Sentinel-2: valori areali NDVI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico	81
Tab. 16. Sentinel-2: valori areali NDWI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico	82
Tab. 17. Sentinel-2: valori areali NDWI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico	82
Tab. 18. Valori areali NDVI pre e post evento	83
Tab. 19. Valori areali NDWI pre e post evento	83
Tab. 20. Classi Δ NDVI	85
Tab. 21. Indici NDVI gennaio 2018-2025	86
Tab. 22. Indici NDWI gennaio 2018-2025	86
Tab. 23. Indici NDVI luglio 2018-2024	86
Tab. 24. Indici NDWI luglio 2018-2024	86
Tab. 25. Superfici idriche mascherate	88

Indice delle equazioni

$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	(1).....	42
$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR}$	(2).....	42
$LoD_{95} = \pm 1,96 \sqrt{\sigma_{pre}^2 + \sigma_{post}^2 + reg_1^2 + reg_2^2}$	(3).....	54
$\Delta NVI = NDVI_{post} - NDVI_{pre} = \frac{NIR_{post}-RED_{post}}{NIR_{post}+RED_{post}} - \frac{NIR_{pre}-RED_{pre}}{NIR_{pre}+RED_{pre}}$	(4).....	68

Lista degli acronimi

GNSS (*Global Navigation Satellite System*)
 UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)
 MSI (*Multispectral Imaging*)
 SAR (*Synthetic Aperture Radar*)
 SfM (*Structure-from-Motion*)
 LiDAR (*Light Detection and Ranging*)
 DSM (*Digital Surface Models*)
 NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)
 VNIR (*Visible-Near-Infrared*)
 ESA (*European Space Agency*)
 SWIR (*Short-Wave Infrared*)
 DTM (*Digital Terrain Model*)
 DoD (*Difference of DEM*)
 DEM (*Digital Elavation Model*)
 M3C2 (*Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison*)
 GEE (*Google Earth Engine*)
 C2C (*Cloud-to-Cloud*)
 NDWI (*Normalized Difference Water Index*)
 PGRA (Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni)
 PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico)
 ALS (*Airborne Laser Scanning*)
 TLS (*Terrestrial Laser Scanning*)
 LoD (*Level of Detection*)
 CSF (*Cloth Simulation Filter*)
 A.R.I.A (Area di Rilevante Interesse Ambientale)
 M3M (Mavic 3 Multispectral)
 nRTK (*network Real Time Kinematic*)
 CP (*Control Point*)
 ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile)
 RGB (*Red Green Blue*)
 GSD (*Ground Sample Distance*)
 IGM (Istituto Geografico Militare)
 ASPRS (*The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*)
 BOA (*Bottom-Of-Atmosphere*)
 IW (*Interferometric Wide swath*)
 SLC (*Single Look Complex*)
 ML (*Machine Learning*)
 AI (Intelligenza Artificiale)

1. Introduzione

1.1. Dinamiche fluviali, cambiamenti climatici e pressioni antropiche

I corsi d'acqua naturali sono sistemi dinamici in cui le sponde e l'alveo subiscono continui processi di erosione, sedimentazione e migrazione laterale. Il monitoraggio di queste dinamiche morfologiche spondali riveste un'importanza cruciale sia per comprendere l'evoluzione naturale degli ecosistemi fluviali, sia per gestire i rischi idrogeologici associati (alluvioni, crolli spondali) in un contesto di cambiamenti ambientali. Negli ultimi decenni, i cambiamenti climatici hanno intensificato l'occorrenza di eventi estremi (piene improvvise, siccità prolungate) che possono amplificare i processi erosivi e deposizionali lungo i fiumi. Le piene eccezionali, ad esempio, causano danni diretti a infrastrutture e accelerano l'erosione di sponde e pianure fluviali, con impatti indiretti sulla qualità degli ecosistemi.

Parallelamente, periodi di magra prolungata favoriscono l'attecchimento della vegetazione su barre e sponde, alterando la morfodinamica fluviale nel lungo termine. Studi recenti sottolineano la necessità di approcci integrati che considerino congiuntamente sedimenti e vegetazione nella valutazione del rischio idraulico, dato che variazioni in questi elementi possono influenzare significativamente la frequenza e l'entità delle piene.

Infatti, processi geomorfologici un tempo trascurati nei modelli di rischio (es. mobilità dell'alveo, presenza di vegetazione riparia) stanno rivelando un ruolo sostanziale nel modulare gli effetti delle inondazioni.

Alle pressioni climatiche si sommano quelle antropiche, che nel secolo scorso hanno profondamente modificato molti sistemi fluviali. L'intervento umano attraverso dighe, prelievi di inerti, rettificazioni e opere di difesa spondale ha spesso ridotto la naturale variabilità morfologica dei fiumi, causando restringimenti d'alveo, incisioni del fondo e una diminuzione della mobilità laterale. In Italia, ad esempio, numerosi fiumi hanno seguito un'evoluzione caratterizzata da una forte riduzione della larghezza dell'alveo attivo (fino al 50–90% in meno) e da incisioni dell'ordine di alcuni metri, soprattutto nel periodo 1950-1990, a causa della combinazione di riforestazione nelle pianure (che ha incrementato la stabilità spondale) e dello sfruttamento intensivo dei sedimenti (estrazione di ghiaia) [1]. Questo ha comportato il passaggio da morfologie intrecciate e multi-corso a canali più stretti e semplificati, spesso incassati, con conseguente perdita di habitat dinamici e maggiore fissità del sistema fluviale. Dopo gli anni '90, in alcuni casi la riduzione delle estrazioni e la ricorrenza di grandi piene hanno portato a una lieve ripresa della mobilità, ma in generale i fiumi antropizzati presentano oggi una dinamica ridotta rispetto al passato.

Al contrario, in pochi casi rimasti relativamente indisturbati, come il fiume Tagliamento in Friuli-Venezia Giulia, spesso citato come uno degli ultimi corsi d'acqua “incontaminati” d'Europa, le dinamiche naturali rimangono vivaci. Nel Tagliamento, caratterizzato da estesi tratti a canali intrecciati, si osservano cicli naturali di colonizzazione vegetale e riattivazione morfologica in risposta al regime idrologico: periodi pluriennali di portate moderate favoriscono l'espansione rapida della vegetazione pioniera sulle barre fluviali, l'unione di macchie vegetate e la stabilizzazione di parte dell'alveo, mentre regimi di piena successivi possono rimuovere queste colonizzazioni nei tratti meno consolidati.

Uno studio condotto su un tratto di 21 km del Tagliamento ha evidenziato tramite dati multispettrali satellitari come dopo una grande piena (ottobre 2004) sia seguita una fase di bassa dinamicità idrica di due anni in cui l'area vegetata è cresciuta rapidamente, consolidandosi al punto da resistere in parte alle piene successive; viceversa, in settori con minore vigore vegetativo, la vegetazione instaurata è stata facilmente rimossa dai successivi eventi di piena. Questo esempio illustra come clima e vegetazione interagiscono nel modulare le trasformazioni dell'alveo: la velocità di crescita delle piante riparie risulta determinante nella loro capacità di influenzare le dinamiche fluviali [2].

In sintesi, lo studio delle dinamiche spondali nei sistemi fluviali è reso oggi ancor più importante dagli effetti del cambiamento climatico e dalle alterazioni antropiche. Comprendere come e dove l'alveo si modifica, e come la vegetazione risponde o contribuisce a tali modifiche, è fondamentale per prevedere l'evoluzione futura dei corsi d'acqua e pianificare interventi di mitigazione e adattamento. Ciò è vero sia per fiumi relativamente indisturbati (dove tali studi aiutano a conservare processi naturali preziosi) sia per contesti fortemente regolati (dove il ripristino di una maggiore dinamicità morfologica può essere un obiettivo di riqualificazione ecologica). Tuttavia, monitorare e quantificare accuratamente questi processi su scale spazio-temporali adeguate presenta notevoli sfide, in quanto i metodi tradizionali di rilievo mostrano limiti significativi nel catturare la complessità e l'estensione delle modifiche fluviali moderne. Nella sezione seguente verranno discussi tali limiti e come le nuove tecnologie geomatiche permettono di superarli.

1.2. Limiti dei metodi tradizionali e innovazioni delle tecniche geomatiche

Il monitoraggio geomorfologico fluviale, sino a pochi anni fa, si basava prevalentemente su metodi tradizionali: rilievi topografici di campagna (livellazione, rilievo topografico con stazioni totali, tracciamento con ricevitori satellitari GNSS (*Global Navigation Satellite System*)) lungo transesti o pochi punti, oppure analisi di foto aeree e mappe storiche. Questi approcci, pur fornendo dati preziosi, presentano diversi limiti intrinseci. I rilievi topografici in-situ, infatti, coprono solo porzioni limitate di alveo (es. sezioni trasversali ogni qualche centinaio di metri) e richiedono molto tempo; ne risulta una rappresentazione spaziale discontinua e frammentaria delle forme fluviali. Inoltre, campagne di misura ripetute con frequenza elevata (es. dopo ogni piena significativa) sono spesso impraticabili logisticamente ed economicamente. L'uso delle fotografie aeree tradizionali (da aereo con pilota) ha permesso di mappare interi tratti fluviali sin dagli anni '50, ma con alcune limitazioni: le immagini storiche spesso hanno risoluzioni modeste (metri o decine di metri per pixel) e precisione geometrica non uniforme; la loro acquisizione tipicamente avveniva con cadenza pluriennale (es. voli aerofotogrammetrici regionali ogni 5-10 anni), insufficiente a cogliere cambiamenti rapidi; infine, l'analisi fotogrammetrica stereoscopica tradizionale richiedeva strumentazione e competenze specialistiche, risultando onerosa. Di conseguenza, molti studi classici sulle dinamiche fluviali si sono basati su confronti di mappe e foto aeree distanziate di decenni, capaci di rilevare grandi variazioni planimetriche (es. arretramento medio delle sponde su scale pluridecennali), ma inadeguate a rilevare cambiamenti topografici sottili o eventi erosivi puntuali su brevi intervalli temporali.

Negli ultimi anni, le tecnologie geomatiche hanno rivoluzionato questo campo, offrendo strumenti per il rilievo ad alta risoluzione, frequenza e automazione. In particolare, tre innovazioni chiave hanno ampliato le possibilità di studio: la fotogrammetria aerea da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), i sensori satellitari multispettrali (es. il sensore MSI (*Multispectral Imaging*) di Sentinel-2) e i sensori satellitari SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (Fig. 1).



Fig. 1. Da sinistra a destra: UAV, Sentinel-2 MSI, Sentinel-1 SAR

Questi nuovi metodi consentono di superare molte limitazioni dei metodi tradizionali, garantendo copertura spaziale continua e monitoraggio ripetuto a costi relativamente contenuti. Ad esempio, l'uso combinato di droni e algoritmi di SfM (*Structure-from-Motion*) consente di generare modelli tridimensionali della topografia fluviale con una densità di punti paragonabile a quella ottenibile con costosi rilievi LiDAR (*Light Detection and Ranging*), ma a una frazione del costo e con maggiore flessibilità operativa, pur senza eguagliare la capacità del LiDAR di penetrare chiome vegetali fitte e mappare il suolo sottostante grazie alla tecnologia multi-eco. La fotogrammetria digitale, applicata a immagini aeree, può produrre nuvole di punti e ortofoto ad altissima risoluzione, ed è ripetibile con frequenze temporali molto elevate, anche dopo ogni evento di piena, se necessario [4]. Questo rappresenta un salto di qualità rispetto al passato: ora è possibile rilevare cambiamenti morfologici minimi (variazioni di quota e traslazioni anche di pochi centimetri) che prima sarebbero passati inosservati, e farlo su interi tratti fluviali con tempistiche relativamente rapide.

Uno studio esemplificativo ha evidenziato queste potenzialità applicandole al monitoraggio dell'erosione spondale: impiegando la fotogrammetria aerea da UAV lungo un tratto di fiume di media dimensione, è stato possibile documentare dettagliatamente il processo di arretramento di una

sponda restaurata (lunghezza ~1,2 km) attraverso 8 rilievi nell'arco di un anno [5]. Questa tecnica ha fornito un insieme unico di caratteristiche rispetto ai metodi precedentemente usati per monitorare le sponde, offrendo una risoluzione altissima e una rapidità di esecuzione in campo impensabili con i rilievi topografici tradizionali. Si può ormai affermare che i SAPR (Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto) siano divenuti piattaforme di telerilevamento a bassa quota, grazie alla loro mobilità e flessibilità, e che abbiano democratizzato l'accesso a dati territoriali di qualità prima riservati a costose campagne aeree [6]. È emblematico il fatto che la comunità geomorfologica abbia rapidamente adottato queste tecniche: secondo alcune rassegne, nell'ultimo decennio le pubblicazioni scientifiche sull'impiego di fotogrammetria aerea con droni in geomorfologia hanno visto una crescita esponenziale, segno del riconoscimento del valore aggiunto di tali metodi. In ambito fluviale, rilevamenti fotogrammetrici ripetuti ad alta risoluzione sono ormai ampiamente impiegati per monitorare cambiamenti morfologici rapidi sia in contesti costieri sia fluviali. Ad esempio, la produzione di ortofoto georeferenziate da aerofotogrammetria e la comparazione di DSM (*Digital Surface Models*) costituiscono oggi una prassi consolidata per quantificare erosioni e depositi in seguito ad eventi di piena. Tali confronti differenziali forniscono dataset dettagliati sui pattern di cambiamento del letto e delle sponde, permettendo di mappare con accuratezza le zone di erosione netta e sedimentazione e persino di identificare processi specifici come crolli in massa delle sponde o traslazioni di massi instabili [7].

Parallelamente, i sensori multispettrali montati su drone o su piattaforme satellitari hanno aperto nuove prospettive per lo studio della componente vegetale e della superficie umida nei sistemi fluviali. I metodi tradizionali (es. rilievi botanici a terra) fornivano dati puntuali sulla vegetazione riparia, mentre le foto aeree a colori reali offrivano solo informazioni qualitative sull'estensione del manto vegetale. Oggi, grazie a camere multispettrali e iperspettrali, si possono derivare indici di vegetazione come l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) con risoluzioni centimetriche, purché le immagini siano preliminarmente calibrate in riflettanza al suolo, condizione indispensabile per ottenere valori quantitativi. Un drone equipaggiato con sensori VNIR (*Visible-Near-Infrared*) può produrre mappe di NDVI con pixel di pochi centimetri, evidenziando dettagliatamente la distribuzione e la vigoria della vegetazione su barre fluviali e sponde. Ciò consente di distinguere ad esempio aree a densa copertura erbacea da superfici nude o ghiaiose, di rilevare variazioni nella salute/stato fisiologico della vegetazione (foglie più verdi e attive hanno NDVI più elevati) e di monitorare l'evoluzione temporale della colonizzazione vegetale post-piena. In una recente ricerca, è stato sottolineato come la disponibilità di droni e sensori miniaturizzati abbia migliorato notevolmente i limiti del telerilevamento tradizionale nell'osservazione della vegetazione riparia [8]. In passato, le immagini satellitari a bassa risoluzione limitavano la capacità di dettaglio e quelle ad altissima risoluzione (<1 m) erano disponibili solo per piccole aree e a costi elevati, con vincoli di copertura nuvolosa e luce. Oggi, invece, l'impiego di UAV colma queste lacune consentendo acquisizioni flessibili nelle finestre temporali ottimali (es. immediatamente dopo un evento di disturbo, o in condizioni di visibilità ideali) e fornendo dati speditivi ad altissima risoluzione per analisi quantitative della vegetazione. Grazie a ciò, la quantificazione della vegetazione riparia, in termini di estensione, struttura e funzioni ecologiche, è diventata molto più accurata e facilmente integrabile con gli studi morfologici del fiume. È noto, infatti, che la vegetazione riveste un ruolo chiave nella dinamica fluviale, influenzando la resistenza idraulica, la coesione spondale e la diversità di habitat. Disporre di strumenti per monitorare con continuità e dettaglio la vegetazione lungo i fiumi risponde a una crescente domanda sia scientifica che gestionale, poiché consente di valutare lo stato di salute degli ecosistemi ripari e di individuare precocemente cambiamenti significativi (es. proliferazione di specie invasive, mortalità di vegetazione per stress idrico, ecc.) in relazione alle modifiche morfologiche o ai fattori climatici.

Infine, la nuova generazione di satelliti ottici e radar ha messo a disposizione dati geospaziali gratuiti, frequenti e relativamente ad alta risoluzione anche utili per lo studio dei sistemi fluviali su larga scala. I satelliti Sentinel del programma Copernicus dell'ESA (*European Space Agency*) ne sono un esempio paradigmatico: Sentinel-2, con i suoi sensori multispettrali a 13 bande (intervallo spettrale

443-2190 nm, dal visibile al SWIR (*Short-Wave Infrared*)) e risoluzione geometrica fino a 10 m, fornisce immagini dell'intero globo con ripasso di 5 giorni, consentendo di derivare indici come l'NDVI per monitorare lo stato della vegetazione, oltre a tracciare l'estensione delle acque superficiali e la copertura del suolo con una frequenza temporale prima inimmaginabile. Nell'ambito fluviale, questo significa poter tracciare l'evoluzione morfologica e il cambiamento della copertura della vegetazione su scale decennali e su bacini interi: ad esempio, un lavoro ha analizzato 30 anni di immagini Landsat/Sentinel per il fiume Po, evidenziando variazioni nell'ampiezza dell'alveo bagnato e nella copertura vegetale riparia in risposta al regime idrologico [1]. Dallo studio è emerso, tra l'altro, che gran parte del tratto studiato ha mantenuto un alveo attivo stabile (oltre il 90% di frequenza di occupazione da parte dell'acqua in 30 anni in circa due terzi dell'area, indice di stabilità planimetrica), con perdita di complessità fluviale laddove i rami secondari si sono chiusi e l'alveo si è ristretto. Contestualmente, l'analisi multitemporale dell'NDVI satellitare ha mostrato ciclicità stagionali marcate (massimi di vigore vegetativo in tarda primavera, coincidenti con i primi picchi di piena da fusione nivale) e tendenze spazio-temporali utili a comprendere come la vegetazione risponda ai regimi di flusso. Questi risultati evidenziano l'utilità dei dati ottici da satellite nel quantificare cambiamenti morfologici e vegetazionali su larga scala, supportando applicazioni di gestione del rischio alluvioni e pianificazione fluviale. In parallelo, i satelliti Sentinel-1 forniscono immagini radar in banda C, indipendenti dalle condizioni di luce e in grado di acquisire informazioni attraverso le nubi, qualità preziosa per il monitoraggio in tempo quasi reale di eventi come piene improvvise. Le serie SAR di Sentinel-1 si sono affermate come strumento efficace per mappare le estensioni di inondazione durante eventi alluvionali (grazie al forte contrasto di *backscatter* tra superfici d'acqua lisce e superfici ruvide) e per monitorare variazioni dell'umidità del suolo e della rugosità superficiale, parametri indirettamente legati allo stato morfologico e vegetazionale del corridoio fluviale. Tuttavia, l'impiego del SAR per rilevare direttamente i cambiamenti morfologici del terreno fluviale presenta ancora delle limitazioni. Uno studio recente ha valutato la capacità del Sentinel-1 di individuare variazioni planimetriche e altimetriche dell'alveo: i risultati indicano che le immagini radar, pur sensibili a modifiche macroscopiche (es. creazione di nuovi bracci fluviali o grandi variazioni del livello dell'acqua), non sono adatte a rilevare cambiamenti morfologici sottili (dell'ordine di meno di 2 m in verticale) nelle aree fluviali [9]. In pratica, variazioni modeste della topografia fluviale spesso non producono differenze sufficientemente significative nel *backscatter* o nella coerenza interferometrica SAR, rendendo difficile distinguerle dal rumore di fondo. Ciò pone enfasi sulla necessità di utilizzare i dati Sentinel-1 con cautela per il *change detection* geomorfologico: essi vanno preferibilmente integrati con altre fonti (es. modelli DSM da fotogrammetria o dati ottici) per ottenere una rappresentazione completa dei cambiamenti. Nonostante tali limiti, il radar rimane un sistema prezioso perché garantisce un monitoraggio continuo anche in condizioni meteorologiche avverse e in condizioni di piena (quando le acque torbide o il cielo coperto rendono difficoltoso l'uso dei sensori ottici). In sintesi, l'evoluzione tecnologica vede oggi convergere rilievi fotogrammetrici da UAV ad alta risoluzione e telerilevamento satellitare, fornendo una serie di strumenti con caratteristiche complementari per analizzare i processi fluviali su scale differenti.

Nei paragrafi successivi verranno approfonditi gli indicatori specifici che queste tecniche consentono di monitorare e le metriche impiegabili per quantificare i cambiamenti, nonché il valore aggiunto derivante dalla combinazione di dati provenienti da sorgenti diverse (droni, piattaforme satellitari, dataset regionali) nelle applicazioni di analisi fluviale contemporanea.

1.3. Indicatori geomorfologici e vegetazionali monitorabili e metriche di *change detection*

L'adozione di nuove tecniche di rilievo ha ampliato il ventaglio di indicatori quantitativi con cui è possibile descrivere e monitorare i processi morfologici e vegetazionali nei sistemi fluviali. Di seguito si passa in rassegna i principali indicatori (geomorfologici e biofisici) e le metriche di *change detection* oggi utilizzati, evidenziando come i dati acquisiti da sensori trasportati da UAV, multispettrali e SAR ne permettano la stima con elevato dettaglio:

- i. retrocessione delle sponde: la misura dell'arretramento laterale delle sponde (*bank retreat*) è un indicatore chiave dell'erosione fluviale. Tradizionalmente veniva stimata confrontando la posizione del bordo dell'alveo in mappe o foto aeree di epoche diverse. Oggi, grazie a ortofoto ad alta risoluzione da UAV, è possibile rilevare spostamenti anche dell'ordine di pochi centimetri. Ad esempio, tramite sequenze di ortofoto da drone georiferite con precisione centimetrica, Duró et al. sono riusciti a quantificare l'evoluzione di una scarpata erosiva rilevando crolli e arretramenti puntuali lungo il suo sviluppo [5]. Questa informazione può essere sintetizzata in metriche come la distanza media di arretramento per anno (m/anno) o le variazioni areali, utile per valutare il tasso di erosione spondale e confrontarlo tra diversi tratti o periodi;
- ii. volumi di erosione e deposizione: confrontando DTM (*Digital Terrain Model*) o DSM di epoche diverse, è possibile calcolare i volumi di materiale eroso e depositato in un certo intervallo di tempo. Questa metrica tridimensionale offre una quantificazione diretta del bilancio sedimentario di un tratto fluviale (es. volume netto perso o guadagnato) ed evidenzia la distribuzione spaziale di erosioni e deposizioni. La differenza tra modelli altimetrici (DoD, *Difference of DEM (Digital Elevation Model)*) può essere ottenuta da dati LiDAR o, appunto, da nuvole di punti fotogrammetriche da UAV. In quest'ultimo caso, la densità di punti consente di identificare cambiamenti localizzati, come incisioni di nuovi canali secondari o accumuli di barre, con risoluzione molto fine. Ad esempio, nel caso di monitoraggi post-piena con UAV, le mappe di differenza DSM hanno permesso di individuare pattern caratteristici del ciclo erosivo, quali crolli in massa delle sponde, depositi di blocchi di frana alla base delle scarpate, e fenomeni di sottoscavamento del piede spondale [5]. Tali prodotti, se associati a una stima delle incertezze di misura, consentono anche di distinguere i cambiamenti significativi (oltre la soglia di errore) dai rumori e di calcolare indicatori come il volume totale eroso/depositato e il volume medio per unità di lunghezza di alveo, molto utili per confronti tra diversi eventi di piena;
- iii. variazioni planimetriche dell'alveo: includono metriche come la larghezza media dell'alveo attivo, l'area occupata dall'acqua o dai depositi fluviali in differenti date, la posizione dei canali e la lunghezza del loro percorso. Questi indicatori derivano tipicamente dalla classificazione di immagini (aeree o satellitari) in categorie acqua, suolo nudo, vegetazione. Con immagini multispettrali ad alta risoluzione, si può ad esempio estrarre l'area del canale bagnato in vari momenti e valutare come essa cambia nel tempo. Inoltre, combinando molte osservazioni, si possono calcolare statistiche di persistenza spaziale del canale: ad esempio, qual è la frequenza con cui una certa area territoriale è stata occupata dall'acqua nel periodo di osservazione. Questo tipo di analisi, effettuata su serie di immagini Landsat/Sentinel, è stata utilizzata per identificare zone di alveo stabili e mobili lungo il Po [9];
- iv. dimensioni dei sedimenti superficiali: un indicatore geomorfologico meno tradizionale ma di grande rilevanza è la granulometria dei sedimenti di fondo e di barra. La dimensione media dei ciottoli sulla superficie di una barra influenza la mobilità del sedimento e la morfologia del canale. Tradizionalmente stimata con misure manuali o analisi fotogrammetriche ravvicinate, oggi la granulometria superficiale può essere stimata anche da telerilevamento. In studi recenti,

si è sperimentato l'uso congiunto di immagini da drone e dati Sentinel-2 per predire classi di grandezza dominante dei ciottoli su lunghe tratte fluviali [10]. In un caso, tramite *machine learning*, si è riusciti a mappare il passaggio da sedimenti ghiaiosi a sabbiosi lungo ~300 km di fiume Po, sfruttando la correlazione tra riflettanza multispettrale a 10 m e granulometria misurata su campioni ad alta risoluzione. Questa ricerca indica che indicatori finora misurati solo localmente potrebbero in futuro essere monitorati su vasta scala integrando dati multi-sorgente;

- v. copertura e vigoria della vegetazione riparia: sul fronte bio-vegetazionale, l'NDVI è l'indicatore per eccellenza per quantificare il grado di copertura vegetale e il suo cambiamento. Dalle mappe NDVI (da satellite o drone) si possono derivare metriche come la percentuale di area vegetata nell'alveo attivo, la biomassa relativa (stimabile dall'NDVI medio o altri indici spettrali avanzati), e identificare variazioni nel tempo in risposta a eventi di disturbo. Ad esempio, un calo esteso di NDVI su una barra fluviale dopo una piena indica la rimozione della vegetazione; viceversa, un progressivo aumento negli anni successivi segnala la ricolonizzazione in atto. Indici multi-temporali permettono anche di valutare la resilienza della vegetazione: nel Tagliamento, come ricordato, si sono osservate zone in cui le piante insediate in periodi di magra sono state in grado di resistere parzialmente a piene moderate (NDVI rimasto elevato anche post-piena), indicando un rapido raggiungimento di una fase arbustiva più resistente [3]. Oltre all'NDVI, altri indicatori vegetazionali utili includono: la diversità spettrale o eterogeneità, l'altezza della vegetazione (ricavabile da differenza DSM vs DTM se disponibili modelli del suolo, o da LiDAR), e la frammentazione degli habitat (es. dimensione media e densità delle macchie vegetate nell'alveo). Molte di queste metriche possono essere derivate da classificazioni di immagini aeree/satellitari, distinguendo categorie come acqua, sedimento nudo, erba bassa, cespugli/alberi. L'accuratezza di tali prodotti è sensibilmente migliorata grazie all'alta risoluzione: ad esempio, l'uso combinato di dati UAV come *training set* per la classificazione di immagini Sentinel-2 ha mostrato notevoli benefici nel mappare con continuità corridori fluviali distinguendo acqua, vegetazione e sedimenti esposti [11]. Questo approccio ibrido consente di ottenere indicatori come la lunghezza totale dei bordi vegetazione/acqua, indicativa del grado di interazione fiume-vegetazione, o l'indice di ombreggiamento ripario;
- vi. metriche di *change detection* 3D avanzate: con l'avvento delle nuvole di punti da fotogrammetria o laser scanning, sono stati sviluppati algoritmi dedicati per estrarre cambiamenti direttamente in 3D. Il metodo M3C2 (*Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison*), è attualmente uno degli strumenti di riferimento per confrontare nuvole di punti di epoche diverse in ambito geomorfologico [12]. Esso calcola distanze punto-punto lungo la direzione normale alle superfici, superando i limiti dei semplici differenziali verticali e tenendo conto della rugosità locale [13]. In pratica, per ogni posizione vengono misurate le variazioni di distanza tra la superficie iniziale e finale lungo la perpendicolare al terreno, producendo una mappa dettagliata dei cambiamenti con indicazione statistica della significatività (livello di *detection* legato alla variabilità dei punti). Questo consente ad esempio di isolare zone di abbassamento o innalzamento del terreno (erosione/deposizione) escludendo variazioni entro la soglia di incertezza. In ambito fluviale, l'M3C2 può essere applicato a nuvole di punti UAV pre e post-piena per identificare non solo l'entità dei cambiamenti, ma anche la loro distribuzione tridimensionale (es. uno scarrocciamento laterale di massi o uno scivolamento di sedimento lungo un argine vengono catturati come vettori di spostamento nella direzione normale). Queste analisi avanzate arricchiscono le metriche tradizionali, fornendo una base più solida per interpretazioni processuali (es. distinguere un abbassamento per compattazione da un'erosione netta, valutare il contributo di singoli episodi di collasso al bilancio annuale, ecc.).

In definitiva, l'insieme di indicatori monitorabili è oggi molto ampio e copre sia aspetti morfologici (volumi di sedimento, spostamenti lineari, aree e lunghezze caratteristiche dell'alveo) sia aspetti

ecologici (coperture vegetali, vigoria, struttura). La sfida risiede nel selezionare le metriche più appropriate ai processi di interesse e nell'automatizzarne l'estrazione in modo robusto. In questo senso, l'integrazione di dati e l'uso di algoritmi di *change detection* avanzati permettono di ottenere diverse informazioni sulla dinamica fluviale, massimizzando il contenuto informativo ricavabile dai nuovi dati ad alta risoluzione.

1.4. Valore della combinazione di fonti dati: integrazione UAV, dati regionali e satellitari

Un notevole vantaggio offerto dall'era delle tecniche geomatiche moderne è la possibilità di combinare dati provenienti da fonti eterogenee per ottenere una visione più completa e multiscala dei fenomeni fluviali. Ciascuna piattaforma, drone, aereo, satellite, ha infatti punti di forza e debolezza complementari, e la loro integrazione consente di colmare reciproche lacune, migliorando l'accuratezza e la significatività delle analisi.

In primo luogo, esiste un compromesso, sia spaziale sia temporale, fra dati acquisiti da UAV e da piattaforme satellitari: i droni forniscono dettaglio spaziale eccezionalmente fine (cm), ma coprono aree relativamente piccole per singolo volo (tipicamente qualche km²), mentre i sensori satellitari coprono vaste aree in un singolo fotogramma (centinaia di km²), ma con risoluzioni medie dell'ordine di 10 m. Inoltre, l'impiego estensivo dei droni a scopo di acquisizioni fotogrammetriche o LiDAR su lunghe tratte fluviali può diventare oneroso in termini di tempo e risorse (voli multipli, processamento di grandi moli di immagini). Diversi studi evidenziano che la scala di applicazione ottimale dei droni è quella del sito o tratto di fiume limitato, mentre per coperture a scala di bacino risultano più pratici i dati satellitari [14][15]. Ad esempio, Navarro et al. (2019) notano che sebbene la fotogrammetria da UAV produca stime molto accurate di parametri forestali locali, essa risulta poco efficiente per inventari su larga scala, per i quali i satelliti forniscono invece una copertura più economica dal punto di vista gestionale [16]. Nel contesto fluviale, ciò suggerisce una strategia di monitoraggio gerarchica: UAV impiegati su aree campione rappresentative (es. tratto critico con interventi, o sezione di riferimento) da cui ottenere misure affidabili, e satelliti utilizzati per estendere l'analisi all'intero corso d'acqua o bacino, con calibrazione e taratura basata sui dati UAV. Un approccio di questo tipo è stato sperimentato con successo per stimare parametri difficilmente misurabili dal solo satellite. I risultati mostrano che questo approccio ibrido (dati satellitari gratuiti calibrati con rilievi low-cost da drone) può colmare la lacuna tra dettaglio ed estensione, rappresentando un passo promettente verso la mappatura automatizzata di caratteristiche fluviali su lunghi tratti, con possibilità di ripetere facilmente le analisi nel tempo.

Un'altra sinergia importante è quella tra dati regionali e rilievi da piattaforme UAV. Molte amministrazioni pubbliche dispongono di ortofoto aeree e scansioni LiDAR acquisite periodicamente (es. 5-10 anni) a scala regionale per scopi di pianificazione. Questi *dataset* forniscono un contesto temporale di lungo termine: dai confronti tra prodotti a epoche differenti è possibile ricavare il bilancio morfologico pluriennale. Integrando in questa serie anche i DSM/DTM ottenuti da fotogrammetria aerea da UAV in anni intermedi (magari subito dopo eventi estremi, non coperti dal LiDAR), si ottiene una serie temporale più densa di modelli altimetrici, migliorando la comprensione della frequenza e magnitudo dei cambiamenti. Inoltre, i dati aerofotogrammetrici possono fungere da riferimento ad altissima risoluzione per valutare l'accuratezza e la capacità informativa dei dati a risoluzione inferiore: ad esempio, consentono di validare se un cambiamento rilevato dal LiDAR corrisponde effettivamente a un'erosione diffusa o se invece è composto da micro-variazioni puntuali identificabili solo a scala centimetrica.

L'integrazione multisorgente include anche la fusione di dati di natura diversa (ottici, topografici, radar). Combinare immagini ottiche e radar, ad esempio, può migliorare le classificazioni: le prime distinguono bene vegetazione e sedimento in condizioni di cielo sereno, i secondi identificano l'acqua anche sotto nuvole o vegetazione rada. Sebbene questa frontiera sia in continuo sviluppo, è prevedibile che l'utilizzo simultaneo di dati SAR e ottici, magari elaborati su piattaforme *cloud* come GEE (*Google Earth Engine*), fornisca in futuro un quadro più robusto delle condizioni fluviali, mitigando l'effetto di limitazioni specifiche di ciascun sensore (es. ombre nelle immagini ottiche e rumore nei dati SAR).

Riassumendo, l'integrazione di fonti dati consente di ottenere un monitoraggio multi-scala e multi-temporale: dall'osservazione microscopica (scala di singolo albero o masso) col drone, a quella

macroscopica (scala di bacino) col satellite, coprendo l'intervallo intermedio con dati aerofotogrammetrici o LiDAR regionali. Tale approccio integrato è particolarmente utile per i sistemi fluviali, dove fenomeni locali (es. crollo di una sponda) possono avere cause o conseguenze a scala più ampia (es. aumento della torbidità a valle, riduzione sezione di deflusso e aumento rischio esondazione). Un monitoraggio gerarchico rende possibile collegare queste scale: ad esempio, rilevare con sensori da UAV i volumi di sedimento mobilitati da un singolo evento erosivo e poi utilizzare il satellite per seguire la traccia di tale sedimento a valle (es. incremento di torbidità o deposito in golena) nelle settimane seguenti. Non da ultimo, l'integrazione di dati multi-sorgente ha benefici anche in termini di verifica incrociata e ridondanza informativa: se un cambiamento è osservato sia dal drone che dal satellite, la confidenza nell'interpretazione aumenta. Viceversa, discrepanze tra dati possono rivelare limitazioni (es: un piccolo cambiamento visto dall'UAV, ma non dal satellite indica la soglia di detezione di quest'ultimo). I nuovi flussi di lavoro geomatici vanno quindi sempre più nella direzione di una fusione dei dati: dal livello di acquisizione (missioni coordinate UAV-satellite) a quello di elaborazione (modelli unificati che assimilano diverse fonti) e interpretazione finale.

1.5. Motivazioni scientifiche, ambientali e gestionali della ricerca

Alla luce di quanto discusso, risulta evidente che lo sviluppo di metodi innovativi per l'analisi dei processi morfologici e vegetazionali fluviali non è solo un esercizio accademico, ma risponde a precise necessità scientifiche, ambientali e gestionali. In questa sezione conclusiva dell'introduzione si sintetizzano le motivazioni che giustificano e rendono significativa la ricerca proposta.

Dal punto di vista scientifico, vi è l'esigenza di colmare alcune lacune conoscitive riguardo le interazioni tra morfologia fluviale e vegetazione in contesti dinamici. Ad esempio, nonostante sia noto qualitativamente che la vegetazione riparia può stabilizzare le sponde e influire sulla geometria dell'alveo, la quantificazione di tali effetti (quanto e dove la vegetazione riduce l'erosione, con quali soglie di flusso essa viene rimossa, ecc.) richiede dati dettagliati e un monitoraggio ravvicinato nel tempo. Le tecniche geomatiche permettono di cogliere questi dati e quindi di testare ipotesi e modelli biogeomorfologici con un dettaglio elevato. In particolare, nel caso del Tagliamento, fiume di importanza ecologica internazionale per il suo carattere quasi intatto, la ricerca potrà fornire nuove conoscenze su come un sistema fluviale semi-naturale risponde alle sollecitazioni attuali (regime idrologico attuale, eventuali pressioni umane nel bacino) in termini di evoluzione dell'alveo e delle comunità vegetali. Queste conoscenze arricchiranno il quadro teorico della biogeomorfologia fluviale, offrendo dati reali su scala di campo per validare modelli concettuali e numerici. Inoltre, vi è un contributo metodologico: sperimentare l'integrazione di dati multi-sorgente (fotogrammetria da UAV con camere ottiche e multispettrali, immagini satellitari Sentinel ottiche e radar, dati LiDAR regionali) fornirà indicazioni sulle migliori pratiche di fusione dei dati e sulle potenzialità/difficoltà di estendere a scala maggiore i risultati di dettaglio. Dal punto di vista dell'analisi del cambiamento, l'applicazione di metriche quantitative come analisi C2C (*Cloud-to-Cloud*), NDVI ed NDWI (*Normalized Difference Water Index*) differenziale, a una sequenza temporale di rilievi genererà informazioni sui tassi di cambiamento e sulle soglie di significatività dei processi in atto. Tali risultati potranno essere confrontati con quelli di altri sistemi fluviali studiati, contribuendo al dibattito internazionale su come i fiumi stiano evolvendo nell'epoca contemporanea.

Dal punto di vista ambientale ed ecologico, la ricerca è motivata dalla necessità di tutelare e gestire in modo sostenibile gli ecosistemi fluviali. I fiumi forniscono servizi ecosistemici cruciali (biodiversità, ricarica delle falde, depurazione naturale) ma sono anche tra gli ecosistemi più minacciati. Comprendere le dinamiche naturali di un fiume relativamente indisturbato come il Tagliamento offre un modello di riferimento per la funzionalità ecologica a cui tendere anche in contesti degradati. Ad esempio, conoscere l'estensione e la variabilità della vegetazione pioniera in alveo (che sul Tagliamento ospita specie adattate e fornisce habitat alla fauna) permette di definire parametri di qualità per questi habitat. Monitorare come gli habitat fluviali si contraggono o espandono nel tempo (in relazione a portate o interventi antropici) è fondamentale per valutare lo stato di salute del fiume e l'efficacia di eventuali misure di conservazione. Inoltre, la metodologia sviluppata potrà essere applicata in futuro per sorvegliare specie invasive o problematiche nelle aree riparie, individuandone precocemente la diffusione tramite analisi multispettrali ad alta risoluzione. In sintesi, dotarsi di strumenti di monitoraggio geomatico significa poter osservare l'ecosistema fluviale dettagliatamente e in continuo.

Dal punto di vista gestionale e di pianificazione, infine, la ricerca risponde a concrete esigenze degli enti preposti alla gestione del territorio fluviale. In un contesto di cambiamenti climatici, aumenta la necessità di aggiornare le mappe di pericolosità idraulica e di rimodulare le strategie di difesa: conoscere con esattezza dove il fiume sta erodendo le sponde e a che velocità, o dove nuovi depositi stanno riducendo la sezione di deflusso, è un'informazione fondamentale per valutare i rischi di esondazione e di instabilità degli argini. Le tecniche proposte forniranno output, come mappe di erosione, che possono integrare gli strumenti di pianificazione (PGRA (Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni) e PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico)) aggiornandoli con dati recenti e ad alta risoluzione. Ad esempio, se dal confronto di modelli 3D risulta che in un certo meandro la sponda sta

arretrando di 2 m/anno, i gestori possono decidere se intervenire con opere di protezione mirate oppure pianificare delocalizzazioni di infrastrutture vulnerabili. D'altro canto, la gestione adattativa dei corsi d'acqua (promossa anche dalle direttive europee, come la Direttiva Alluvioni e la Direttiva Acque) richiede di monitorare gli effetti delle misure intraprese. Nel caso del Tagliamento, i risultati di questa ricerca potranno costituire una baseline documentale per future valutazioni: ad esempio, se in futuro si realizzeranno interventi di riqualificazione fluviale o se eventi estremi impatteranno il sistema, i dati raccolti ora consentiranno un confronto quantitativo. Inoltre, l'approccio di monitoraggio integrato sviluppato potrebbe essere esteso ad altri fiumi regionali, fornendo ai tecnici un metodo moderno per tenere sotto controllo l'evoluzione morfologica senza dover sempre ricorrere a costose campagne in campo. In prospettiva, l'adozione di rilievi fotogrammetrici periodici con droni e l'uso sistematico dei dati satellitari potrebbe diventare parte integrante delle pratiche di gestione fluviale, proprio perché offre un compromesso ottimale tra costo e beneficio informativo. Già ora, come emerso in letteratura, i decisori e i gestori manifestano un crescente interesse verso strumenti di monitoraggio avanzati e ad alta risoluzione per i corpi idrici [17][18], interesse che questa ricerca intende soddisfare dimostrandone l'efficacia sul campo. In conclusione, le motivazioni alla base di questa tesi di dottorato sono molteplici e convergenti. Da un lato vi è il fascino scientifico di esplorare le dinamiche di un fiume come il Tagliamento con strumenti geomatici, contribuendo al progresso della conoscenza geomorfologica e ambientale. Dall'altro vi è la responsabilità verso la gestione sostenibile: sviluppare metodi e raccogliere dati che possano aiutare concretamente a preservare i sistemi fluviali e a mitigare i rischi legati alla loro dinamica. L'impiego di tecniche geomatiche, fotogrammetria da UAV, *remote sensing* multispettrale, analisi SAR, integrazione multi-scala, rappresenta il mezzo con cui raggiungere questi obiettivi, colmando il divario tra osservazione di dettaglio e visione d'insieme. Nelle pagine successive della tesi si vedrà come queste premesse vengono tradotte in pratica nel caso studio del Tagliamento (tratto di Ronchis, UD), illustrando nel dettaglio la metodologia adottata, i dati raccolti e i risultati ottenuti, con l'auspicio che essi possano fornire nuove prospettive sia per la ricerca geomatica sia per la gestione fluviale.

2. Stato dell'arte del monitoraggio fluviale con tecniche geomatiche

2.1. Evoluzione delle tecniche di rilievo ad alta risoluzione: fotogrammetria, SfM e LiDAR

Il monitoraggio geomatico ha vissuto nell'ultimo decennio una profonda trasformazione grazie all'avvento di nuove tecniche di rilievo ad alta risoluzione. In particolare, il consolidarsi delle metodologie fotogrammetriche digitali ha rivoluzionato la capacità di ricostruire con dettaglio la morfologia fluviale. Westoby et al. (2012) hanno dimostrato che la fotogrammetria costituisce uno strumento efficace e a basso costo per applicazioni geoscientifiche, aprendo la strada al suo impiego diffuso in ambito fluviale [19]. Fonstad et al. (2013) hanno ulteriormente consolidato questo progresso, definendolo un "nuovo sviluppo" nelle misure fotogrammetriche per la geomatica fluviale [20]. Di conseguenza, oggi la tecnica fotogrammetrica da UAV è ampiamente applicata per ottenere ortofoto ad alta risoluzione e modelli altimetrici dettagliati del letto e delle sponde dei fiumi [21]. Grazie a tali prodotti digitali, è possibile analizzare caratteristiche idromorfologiche con un dettaglio prima impensabile, ad esempio stimando volumi di sedimenti mobili, misurando cambiamenti topografici dopo piene o valutando processi erosivi lungo le sponde. Hemmelder et al. (2018) ne offrono un esempio applicativo: mediante immagini acquisite da UAV e ricostruzioni SfM, hanno monitorato l'evoluzione morfologica e l'erosione spondale di un torrente alpino, dimostrando la capacità di questa tecnica di caratterizzare con grande dettaglio fenomeni erosivi localizzati [22].

Parallelamente, l'impiego di sensori multispettrali a bordo di droni ha esteso le potenzialità del rilievo geomatico ai parametri biofisici e vegetazionali. Le camere multispettrali su UAV consentono infatti di acquisire immagini non solo nel visibile RGB (*Red Green Blue*) ma anche nel vicino infrarosso, permettendo di calcolare indici di vegetazione come l'NDVI e l'NDWI. L'NDVI risulta un indicatore consolidato per identificare la copertura vegetale e il suo stato di vigore, rivelandosi particolarmente utile nello studio degli ecosistemi ripariali [23][24]. Ad esempio, Michez et al. (2016) hanno dimostrato che combinando immagini multispettrali ad altissima risoluzione acquisite da UAV in diverse stagioni è possibile classificare la vegetazione riparia a livello di specie e valutarne lo stato di salute [25]. In quello studio, l'uso di indici spettrali e analisi multitemporali ha consentito di discriminare specie arboree lungo un fiume e di identificare segni di stress vegetativo, evidenziando il potenziale delle tecniche geomatiche per applicazioni ecologiche fluviali. Più in generale, la disponibilità di dati multispettrali ad alta risoluzione temporale ha aperto la strada a metodi di telerilevamento avanzati: attraverso l'analisi dell'indice NDVI su serie temporali, è possibile rilevare anomalie o cambiamenti nella vegetazione ripariale in risposta a eventi di piena, interventi di gestione o *trend* climatici [23]. Per esempio, studi su aree umide deltizie condotti con Sentinel-2 hanno mostrato variazioni significative nella copertura vegetale in pochi anni, identificando espansioni o regressioni di specie arboree con accuratezze di classificazione superiori all'80-90% grazie all'uso combinato di serie NDVI e classificatori di *machine learning* [26]. Questi risultati evidenziano come le tecniche geomatiche multispettrali forniscano indicatori quantitativi per monitorare la dinamica della vegetazione fluviale in modo scientificamente robusto.

Un altro pilastro dello studio geomatico dei fiumi è rappresentato dalla tecnologia LiDAR, sia aerea che terrestre. I rilievi LiDAR aerei o *Airborne Laser Scanning* (ALS) forniscono modelli digitali del terreno ad alta densità su vaste aree, con la capacità unica di penetrare la copertura vegetale e restituire sia la quota del suolo nudo che la struttura tridimensionale della vegetazione. Già dai primi anni 2000, i dati LiDAR hanno rivoluzionato la documentazione della geomorfologia fluviale permettendo mappature dettagliate di alvei e pianure inondabili. Oggi, i DTM da rilievi LiDAR ad alta risoluzione coprono estensioni regionali e sono spesso resi disponibili dalle Pubbliche Amministrazioni, alimentando un crescente interesse per l'uso di queste informazioni in metodi automatizzati di analisi idro-geomorfologica. Ad esempio, in Italia molte Regioni mettono a

disposizione modelli LiDAR del territorio con risoluzioni dell'ordine del metro o inferiori; tali dataset consentono di caratterizzare con precisione la geometria dell'alveo, identificare strutture morfologiche (barra, terrazzi fluviali, canali secondari) e valutare la rugosità superficiale per modelli idraulici [27]. La letteratura evidenzia come l'integrazione di dati LiDAR migliori notevolmente la completezza informativa dei rilievi fotogrammetrici: unendo la densità e l'accuratezza del LiDAR con la flessibilità e l'informazione spettrale delle nuvole di punti da fotogrammetria, si ottengono modelli ibridi capaci di descrivere sia la topografia del territorio sia la copertura vegetale in modo integrato (si veda ad esempio Smith & Vericat 2015, che combinano fotogrammetria, LiDAR e GNSS per modellare l'erosione [28]). Sul fronte LiDAR terrestre o *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), gli strumenti sono posizionati a terra per monitorare processi localizzati, come l'erosione di sponda o l'evoluzione di versanti instabili lungo i fiumi. Le tecniche LiDAR forniscono una base di riferimento topografica estremamente accurata e completa, che ha migliorato sia la comprensione dei processi fluviali su larga scala (es. modellazione delle piene e valutazione del rischio inondazione) sia il dettaglio con cui si possono analizzare micro-variazioni morfologiche (es. erosioni localizzate).

2.2. Rilievo multispettrale e radar: contributi satellitari

Contestualmente, i progressi nei sistemi di telerilevamento satellitare hanno arricchito lo stato dell'arte del monitoraggio fluviale, specialmente per quanto riguarda osservazioni sinottiche e multi-temporali. La missione Sentinel-2 dell'ESA, con i suoi sensori ottici multispettrali a 10m di risoluzione e passaggi ogni cinque giorni, fornisce dati preziosi per l'analisi di fenomeni fluviali su ampia scala. Sebbene la risoluzione spaziale di 10 m sia inferiore a quella ottenibile con sensori fotogrammetrici o LiDAR, essa consente comunque di delineare e seguire nel tempo le principali unità geomorfiche fluviali, come canali attivi e barre di sedimento, lungo interi bacini. Inoltre, l'alta frequenza temporale permette di cogliere variazioni stagionali o in seguito a singoli eventi di piena. Studi recenti hanno applicato algoritmi di *machine learning* alle immagini Sentinel-2 per classificare automaticamente aree fluviali dinamiche: Bozzolan et al. (2023) ad esempio hanno impiegato Sentinel-2 per mappare l'evoluzione di un fiume intrecciato, evidenziando tuttavia come l'incertezza introdotta dalla risoluzione di 10 m possa influire sulla significatività delle delineazioni di alveo attivo e come anche la cadenza temporale (dati settimanali) condizioni la lettura dei cambiamenti [29]. Ciò sottolinea un concetto importante: i dati satellitari a media risoluzione permettono di analizzare *trend* e cambiamenti su grandi distanze e periodi estesi, ma presentano limiti nel rilevare mutamenti di piccola entità o molto localizzati, spesso proprio quelli più rilevanti dal punto di vista operativo, come l'insorgere di erosioni di sponda, la migrazione di barre, la chiusura di canali secondari e l'attecchimento o il declino della vegetazione.

Oltre al multispettrale, contributi significativi derivano dai satelliti radar come Sentinel-1 SAR. Il radar, infatti, rileva il terreno anche attraverso le nubi e indipendentemente dalla luce solare, risultando ideale per monitorare eventi come piene improvvise o cambiamenti dello specchio d'acqua. Le immagini SAR di Sentinel-1 sono particolarmente sensibili alla presenza di acqua superficiale: superfici allagate restituiscono infatti un segnale molto debole (per via della riflessione speculare) e si distinguono nettamente dalle terre emerse ad elevato *backscatter* [30]. Numerosi studi hanno sfruttato questa caratteristica per mappare estensioni di piena e dinamiche di inondazione in tempo quasi reale. In contesti aridi, è stato dimostrato che l'uso combinato di polarizzazioni VV e VH di Sentinel-1 migliora l'accuratezza nel rilevare acque sottili o suoli umidi, fornendo un potente strumento per tracciare l'evoluzione spaziale delle aree allagate [30]. Più di recente, serie temporali Sentinel-1 sono state impiegate anche per valutare fenomeni di arretramento spondale: ad esempio, applicazioni in Bangladesh hanno mostrato la fattibilità di stimare l'erosione di sponda nel tempo lungo il corso d'acqua, con approcci che generano vere e proprie "mappe di erosione" stagionali [31].

In sintesi, le tecniche satellitari, integrando dati ottici multispettrali e radar, completano il quadro delle tecniche geomatiche fluviali, permettendo indagini multi-scalari: dal dettaglio locale (fotogrammetria aerea, LiDAR) alla scala di bacino (Sentinel-1, Sentinel-2), con una continuità temporale elevata.

2.3. Metodi di change detection fluviale

2.3.1. Differenza di DSM (DoD) e analisi di incertezza

Passando dalle tecniche di rilievo ai metodi per l'analisi del cambiamento fluviale, la letteratura recente fornisce un ventaglio di approcci innovativi per la *change detection* in ambito fluviale. Tradizionalmente, il confronto di due rilievi topografici di epoche diverse avviene attraverso la differenza dei rispettivi DSM o DTM. Questo approccio, noto anche come DEM *differencing* o calcolo del DoD, fornisce mappe di variazione altimetrica che evidenziano aree di erosione (differenze negative) e deposizione (positive). Già negli anni 2000 si è compreso, grazie alle ricerche di Lane et al. (2003) che una corretta stima del cambiamento altimetrico richiede di tenere in debita considerazione l'incertezza insita in ciascun modello digitale [32]. Ogni DEM, infatti, possiede errori di misura e risoluzione che, propagati, possono simulare falsi cambiamenti. Per distinguere le variazioni reali dal rumore, Wheaton et al. (2010) introdussero un approccio probabilistico al DoD: calcolare una soglia di minima detezione (*Minimum Level of Detection*, LoD) basata sulle incertezze combinate dei due DEM, al di sotto della quale le differenze vengono considerate non significative [33]. L'adozione di tali metodologie ha portato a studi più robusti di bilancio sedimentario nei fiumi, evitando sovrastime dovute a errori strumentali. Ad esempio, applicando questi metodi su rilievi LiDAR ripetuti, si è visto che l'uso di una soglia uniforme di rilevabilità tende a sovrastimare l'erosione in zone stabili, mentre soglie localmente adattative (dipendenti dall'errore locale) migliorano l'attendibilità delle stime di volume eroso o deposto [34].

2.3.2. Confronto di nuvole di punti (C2C e M3C2)

Parallelamente al *differencing* di modelli raster DSM/DTM, si sono sviluppati approcci di confronto diretto tra nuvole di punti 3D ottenute da rilievi fotogrammetrici o LiDAR successivi. In questo contesto emergono due metodi principali: il C2C e il M3C2. Il metodo C2C calcola, per ciascun punto della prima nuvola, la distanza minima dal punto più vicino nella seconda nuvola. Questo approccio punto-a-punto è concettualmente semplice, ma può risultare sensibile alla distribuzione e densità dei punti nonché all'orientazione locale delle superfici. Infatti, se una superficie subisce una traslazione verticale, il semplice *nearest neighbor distance* potrebbe sottostimare il cambiamento qualora la nuvola di confronto non abbia punti esattamente sulla verticale del primo rilievo. Per superare questi limiti, Lague et al. (2013) hanno proposto l'algoritmo M3C2, implementato come *plug-in* nel software CloudCompare. Il M3C2 combina il confronto punto-punto con l'analisi delle normali locali alle superfici: per ogni punto, invece di cercare il più vicino generico, l'algoritmo proietta i punti della seconda nuvola lungo la normale calcolata sulla prima superficie entro un intorno multi-scala, determinando la distanza lungo la direzione ortogonale [13]. Questo metodo presenta due vantaggi chiave:

- i. la misura della distanza è presa nella direzione “significativa” rispetto alla morfologia locale (essendo lungo la normale alla superficie iniziale);
- ii. viene stimato un intervallo di confidenza sulla distanza calcolata, tenendo conto della variabilità locale dei punti e degli errori di registrazione tra le due nuvole.

In altri termini, M3C2 fornisce non solo una mappa 3D delle differenze, ma anche una stima statistica dell'affidabilità di ciascuna differenza. La potenza di questo approccio è stata confermata da molte applicazioni: ad esempio, in studi su fronti di frana fluviali o su alvei montani, M3C2 ha permesso di evidenziare erosioni e deposizioni distribuite in aree complesse (come pietraie, vegetazione sparsa) con una precisione di pochi centimetri. Alexiou et al. (2021) riportano che mediante M3C2 si possono stimare tassi di erosione del suolo in una frazione del tempo richiesto da

metodi tradizionali, raggiungendo errori minimi dell'ordine di pochi cm a patto di disporre di un adeguato numero di punti di controllo a terra e di un'ottima registrazione tra le nuvole [35]. Nei loro esperimenti su un bacino incendiato in Grecia, la fotogrammetria da UAV abbinata all'algoritmo M3C2 ha rilevato variazioni di micro-topografia (erosione in alveoli e colate di fango) con errori di 1-3 cm, confermando la maggiore sensibilità del rilievo aerofotogrammetrico nel cogliere l'erosione locale rispetto a un TLS, che invece fornisce migliori risultati integrati su scala di versante. In generale, l'impiego congiunto di metodi C2C/M3C2 e differenze di DSM offre una visione complementare: i DoD raster sono utili per bilanci volumetrici e visualizzazione rapida su griglia regolare, mentre i confronti di nuvole conservano il massimo dettaglio e flessibilità (ad esempio permettendo di filtrare o classificare i punti mobili e stabili in base al valore di distanza calcolato).

2.3.3. *Change detection* radiometrico (ortofoto, NDVI, classificazioni)

Oltre ai cambiamenti puramente morfologici, l'analisi geomatica fluviale si interessa anche ai cambiamenti di copertura e uso del suolo nel corridoio fluviale, in particolare alla vegetazione riparia. In questo ambito vengono impiegate tecniche di *change detection* radiometrico che operano su immagini telerilevate multi-temporali, come ortofoto aeree, mappe di indice NDVI o mappe di occupazione del suolo classificate. Un metodo semplice ma efficace è il confronto visivo e digitale di ortofoto storiche: disponendo, ad esempio, di ortofoto di un alveo in epoche diverse, si possono evidenziare arretramenti di sponda, migrazioni laterali del canale, variazioni nell'ampiezza dell'alveo attivo e cambiamenti nella copertura vegetale della piana inondabile [36]. Le foto aeree storiche, quando georiferite accuratamente, si sono rivelate strumenti preziosi per documentare le modifiche planimetriche fluviali su scale decennali, a patto di considerare attentamente l'accuratezza geometrica di ciascuna fonte e l'errore di registrazione reciproca. Downward et al. (1994) misero a punto una metodologia in ambiente GIS per quantificare le variazioni planimetriche sovrapponendo mappe e foto d'archivio: il loro lavoro sottolineava come l'affidabilità delle misure di spostamento d'alveo dipenda in modo critico dal garantire che il cambiamento misurato ecceda gli errori insiti nelle mappe storiche e nel processo di georeferenziazione [37]. Negli ultimi anni, questo approccio "classico" è stato potenziato da classificazioni automatiche su immagini di telerilevamento: più che una semplice differenza di NDVI, si impiega l'NDVI per derivare maschere vegetato/non vegetato su due date fenologicamente omologhe e confrontarle per stimare guadagni o perdite di copertura; quando l'analisi riguarda il vigore all'interno di aree già vegetate, il *differencing* di NDVI è utilizzato solo dopo opportuna normalizzazione radiometrica e fenologica, così da isolare variazioni biologicamente significative da effetti di fondo. Rynkiewicz et al. (2023) hanno sviluppato un modello di *random forest* applicato a coppie di immagini Sentinel-2 e Landsat per rilevare perdite di vegetazione forestale: il metodo, basato su differenze di indici spettrali bi-temporali, ha individuato con accuratezza >97% le aree deforestate in vari intervalli annuali [38]. In ambito fluviale, l'NDVI differenziale non classifica la vegetazione, ma evidenzia variazioni di vigore fotosintetico: un calo persistente su pixel già mappati come fascia arborea riparia è compatibile con perdita di chioma dopo piene eccezionali, mentre aumenti su superfici in precedenza nude indicano possibili colonizzazioni iniziali, da verificare con maschere di copertura indipendenti o con dati ausiliari. Una cautela necessaria è che le variazioni di NDVI devono essere interpretate in relazione alla fenologia e stagionalità: confrontare immagini acquisite nella stessa stagione aiuta a isolare i veri cambiamenti nella biomassa vegetale da differenze dovute solo al ciclo stagionale. In letteratura si trovano applicazioni di NDVI *differencing* per analizzare *trend* di inverdimento/essiccamento delle fasce riparie legati a cambiamenti climatici o antropici [39]. Parallelamente, viene utilizzato il confronto di mappe classificate: ad esempio, una mappa d'uso del suolo di inizio anni 2000 può essere confrontata con una mappa aggiornata al 2020 per quantificare la conversione di zone fluviali da vegetazione a suolo nudo o viceversa. L'approccio delle mappe tematiche richiede di valutare la propagazione degli errori di classificazione, ma offre il vantaggio di riassumere il cambiamento in termini di transizioni

tra classi (foresta, urbano, acqua, sedimento, ecc.), informazioni utili per pianificazione e gestione ambientale.

Un aspetto trasversale che emerge dallo stato dell'arte è la necessità di distinguere il contributo della vegetazione da quello del suolo nei dati geomatici fluviali. La presenza di vegetazione, infatti, può mascherare la reale topografia del terreno sottostante e introdurre ambiguità nell'analisi dei cambiamenti morfologici. Per affrontare questo problema, si sono sviluppati diversi approcci di classificazione e filtraggio sia sulle immagini 2D che sulle nuvole di punti 3D. Nel dominio bidimensionale, la tecnica più diffusa consiste nello sfruttare gli indici spettrali: l'NDVI resta il metodo principe per identificare i pixel coperti da vegetazione fotosinteticamente attiva, separandoli da acqua, suolo nudo o edificato. Tipicamente si fissa una soglia di NDVI (ad es. $>0,2$) per etichettare un pixel come "vegetazione": questo semplice criterio è sorprendentemente efficace in molti contesti ed è largamente utilizzato nelle procedure di classificazione automatica delle aree riparie [40]. Tuttavia, occorre considerare che l'NDVI tende a saturare per coperture molto dense e può confondere acque torbide o suoli umidi con vegetazione sparsa (a causa di valori intermedi di riflettanza nell'infrarosso vicino). Pertanto, alcuni studi combinano all'NDVI altri indici (come NDWI per l'acqua o indici di suolo nudo) in classificatori più complessi, spesso basati su *machine learning*, per distinguere con maggiore accuratezza le diverse classi. Ad esempio, Dong et al. (2022) hanno analizzato delle serie temporali di immagini NDVI derivate da Sentinel-2 per classificare tipi di vegetazione in zone umide [41]. Un'altra strategia è condurre rilievi in periodi di minima presenza fogliare (inverno per latifoglie decidue) così che, nelle immagini RGB o multi-spettrali, la firma spettrale del suolo risulti meno occultata dalla chioma. In contesti temperati, l'utilizzo di foto aeree invernali può facilitare l'estrazione del terreno nudo rispetto a quelle estive, sebbene non elimini completamente l'effetto della vegetazione bassa o sempreverde.

Nel dominio tridimensionale delle nuvole di punti, la sfida è separare i punti appartenenti al terreno da quelli relativi alla vegetazione (arborea o erbacea). Per i dati LiDAR, questa separazione è spesso intrinseca: i sistemi LiDAR multi-eco registrano sia il primo impulso riflesso (solitamente dalla chioma) sia gli ultimi impulsi che spesso corrispondono al suolo; i software di elaborazione LiDAR classificano i punti in "ground" e "non-ground" usando filtri specifici. Uno dei metodi più affermati è il CSF (*Cloth Simulation Filter*) sviluppato da Zhang et al. (2016) [42]. Il CSF tratta la nuvola di punti come una superficie su cui far adagiare virtualmente un "telo" (*cloth*) sotto l'azione della gravità: il telo calerà e si appoggerà sui punti più elevati (cime degli alberi), rimanendo sospeso sopra i punti del terreno. Una volta "steso" il *cloth*, i punti al di sotto di esso vengono classificati come suolo. Questo algoritmo, implementato anche come *plug-in* in CloudCompare, è apprezzato per la sua efficacia e semplicità di parametrizzazione, risultando robusto in svariati scenari di terreno [43]. Nei rilievi fotogrammetrici da UAV, dove la nuvola di punti contiene sia terreno che vegetazione ma senza informazioni multi-eco, filtri simili al CSF vengono utilizzati per generare DTM spogliando il modello digitale di superficie DSM dagli elementi sopraelevati. L'efficacia di questi filtri dipende dalla densità dei punti e dalla complessità della scena: vegetazione molto densa o con sottobosco può impedire completamente la visibilità del suolo nei dati fotogrammetrici, rendendo impossibile ricostruire il terreno sottostante. In tali casi, un approccio è integrare punti LiDAR terrestri o misure GNSS in aree ombreggiate dalla vegetazione per vincolare il modello del suolo. Un altro approccio complementare è segmentare prima la vegetazione nelle immagini 2D (ad esempio con *deep learning* o semplice soglia NDVI) e rimuovere i punti corrispondenti da ciascuna immagine prima della ricostruzione fotogrammetrica, in modo da ottenere nuvole prevalentemente di terreno. Recenti sperimentazioni combinano reti neurali per la segmentazione della vegetazione nelle immagini con la ricostruzione 3D, ottenendo nuvole di punti in cui i punti "verdi" sono etichettati già in fase di generazione [44]. Approcci di *machine learning* 3D utilizzano inoltre descrittori geometrici (es. planarità, verticalità) e attributi radiometrici (colore RGB dei punti) per classificare ciascun punto di una nuvola in categorie come terreno, vegetazione bassa, vegetazione alta, acqua, ecc. Questi metodi richiedono *training* e dataset di riferimento, ma stanno diventando sempre più accurati man mano che la comunità geomatica realizza *dataset* di nuvole di punti.

La distinzione tra terreno e vegetazione è cruciale, ad esempio, per calcolare bilanci sedimentari corretti: includere i cespugli in una differenza di DSM può far apparire come “deposito” la crescita stagionale di biomassa, mentre rimuovendo la vegetazione si isola il vero cambiamento morfologico del suolo. Tuttavia, la rimozione manuale dei punti di vegetazione nelle nuvole è operazione onerosa e soggetta ad errore umano. Alexiou et al. (2021) sottolineano come la rimozione manuale punto-per-punto della vegetazione sia dispendiosa, e auspicano lo sviluppo di algoritmi empirici più efficaci per ridurre i tempi di post-elaborazione [35]. Nello studio citato, notano anche che la vegetazione residua costituisce un problema per entrambe le tecniche (TLS e fotogrammetria da UAV), causando ombre nei dati LiDAR e ricostruzioni superficiali errate nei modelli fotogrammetrici. In pratica, la presenza di vegetazione può portare a “false superfici” nei modelli 3D, o impedire al raggio laser di raggiungere il suolo nei rilievi LiDAR, introducendo *bias* che vanno riconosciuti e corretti per un’analisi accurata.

3. Area di studio

3.1. Il fiume Tagliamento: un fiume intrecciato di elevato valore ambientale e morfodinamico

Il Tagliamento è un grande fiume alpino del Nord-Est Italia (Fig. 2), celebre per il suo alveo intrecciato (a canali multipli) e per aver conservato in larga parte la sua dinamica naturale originaria. Si sviluppa dalle Alpi Carniche e Giulie fino all'Adriatico (sfociando tra Friuli-Venezia Giulia e Veneto) con un corso di circa 170-180 km, drenando un bacino di quasi 3000 km². Nel suo medio-basso corso il Tagliamento forma un ampio corridoio alluvionale attivo (oltre 150 km² di estensione) caratterizzato da un mosaico dinamico di canali, barre ghiaiose e isole fluviali vegetate. Questa complessità geomorfologica e biologica rende il Tagliamento un unicum in Europa, spesso definito l'“ultimo fiume intrecciato intatto” delle Alpi e utilizzato come riferimento per lo studio dei processi fluviali naturali e per la conservazione degli ecosistemi ripari. In condizioni indisturbate, infatti, i suoi canali intrecciati mostrano elevata morfodinamica: l'alveo si sposta e si riconfigura frequentemente, con processi di riconfigurazione dei bracci, migrazione e fusione delle barre e rapida evoluzione delle isole vegetate [45].



Fig. 2. Inquadramento geografico del fiume Tagliamento

Ciò comporta un continuo ricambio di habitat e una ricca biodiversità legata al dinamismo fluviale. Dal punto di vista storico e gestionale, il Tagliamento rappresenta un caso raro di grande fiume privo di dighe lungo l'asta principale. Gran parte dei fiumi simili in Europa sono stati bonificati o arginati rigidamente nel secolo scorso, mentre il Tagliamento conserva ampi tratti a piana alluvionale libera da opere trasversali o longitudinali. Tuttavia, non sono mancate pressioni antropiche: ad esempio, nel Novecento vi sono state estrazioni di inerti dal greto e interventi di arginatura localizzati che hanno influito sulla morfologia del fiume [46]. In particolare, tali interventi hanno contribuito a variazioni dell'ampiezza e della configurazione dell'alveo: studi recenti indicano che il Tagliamento ha subito restringimenti e incisioni del canale in passato a causa di queste attività umane, pur mantenendo un

letto molto ampio. Questi aspetti sottolineano l'importanza del Tagliamento non solo dal punto di vista ecologico, ma anche per la morfodinamica fluviale: il suo comportamento “libero” offre indicazioni preziose sui processi naturali di variazione del corso d'acqua e sugli effetti delle azioni antropiche passate nel contesto fluviale.

3.2. Caratteristiche geomorfologiche del tratto di Ronchis (UD)

Lo studio di dottorato si concentra su un tratto specifico del Tagliamento nel comune di Ronchis (UD), nel medio-basso corso del fiume. Quest'area di studio si colloca indicativamente pochi chilometri a monte della foce (Fig. 3), in una zona di transizione cruciale: qui il Tagliamento passa gradualmente dalla configurazione intrecciata a quella meandriforme man mano che si avvicina al mare [47]. In altre parole, il tratto di Ronchis rappresenta il punto in cui l'alveo pluricursale inizia a convergere in un unico corso sinuoso: a monte permane ancora un alveo ampio con più rami attivi e isole, mentre nel tratto terminale da Ronchis verso la foce la sinuosità del fiume si accentua e il flusso viene incanalato entro un unico alveo meandriforme confinato da argini. Questa configurazione fa sì che il segmento di Ronchis presenti sia le tipiche dinamiche di un fiume intrecciato libero, sia le prime influenze dovute alla maggiore confinamento antropico del basso corso (es. restringimento dell'alveo, incremento della profondità e della velocità del flusso nel canale principale, ecc.).

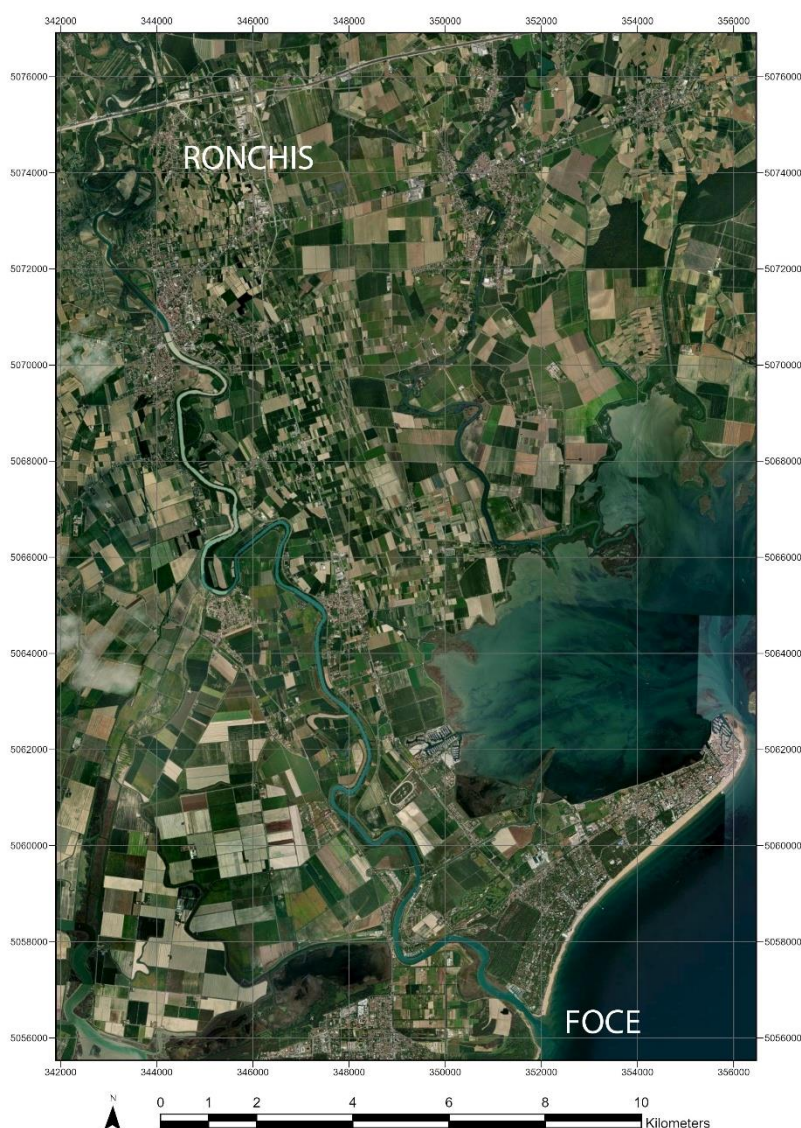


Fig. 3. Inquadramento del tratto finale del Tagliamento

Geomorfologicamente, il profilo altimetrico della valle fluviale in quest'area è relativamente moderato (pianura friulana), ma l'alveo ha costruito nel tempo un notevole letto rialzato con depositi ghiaiosi e sabbiosi: prova ne sono i paleo-alvei e i resti di antiche divagazioni visibili nei dintorni,

testimonianza dei frequenti spostamenti del corso del Tagliamento nel corso degli anni. Il substrato alluvionale altamente erodibile, unito alla portata di piene anche importanti (storicamente il Tagliamento ha registrato eventi di piena distruttivi, ad es. l'alluvione del 1966), conferisce al tratto di Ronchis una elevata propensione all'erosione laterale. Studi idro-geomorfologici regionali confermano infatti che la dinamica morfologica è molto attiva in questo settore: i tratti del Tagliamento nella pianura friulana compresi tra Pinzano (a monte) e Ronchis risultano quelli a più alto indice di mobilità laterale dell'alveo [48], indicando frequenti arretramenti di sponda, migrazioni di meandro e riattivazioni di rami secondari. Tali processi, per quanto naturali e anzi ecologicamente preziosi, pongono anche criticità gestionali perché possono minacciare le attività umane e le infrastrutture presenti ai bordi della piana fluviale.

Dal punto di vista ambientale, il tratto di Ronchis riveste un notevole valore. Lungo le sponde e nelle aree golenali adiacenti è ancora diffusa la vegetazione riparia naturale, con comunità a salici, pioppi, ontani e altri alberi tipici delle fasce fluviali. Questa ricchezza di habitat ha portato a includere il Tagliamento nel novero dei siti protetti a livello regionale: il corridoio fluviale e ripariale tra Ronchis e la foce è classificato come A.R.I.A. (Area di Rilevante Interesse Ambientale) n.8 "Fiume Tagliamento" dalla Regione Friuli-Venezia Giulia, con l'obiettivo di tutelarne l'ecosistema e le caratteristiche naturali peculiari. Oltre al valore ecologico intrinseco, questa vegetazione riparia svolge un ruolo importante nella dinamica spondale, contribuendo in parte a consolidare le sponde con l'apparato radicale e a regolare l'erosione. Tuttavia, nei punti di massima energia della corrente (ad esempio lungo le anse esterne più accentuate) anche boschi maturi possono venire erosi, creando crolli di alberi in alveo e conseguenti variazioni del flusso.

L'uso del suolo nell'area di Ronchis è eterogeneo e riflette la convivenza tra ambiente fluviale e attività antropiche di pianura. Al margine della fascia riparia, sopra le sponde più alte, prevale l'agricoltura (seminativi, campi aperti) alternata a pioppeti coltivati e a lembi di bosco ripariale residuo. Questa configurazione fa sì che in alcuni tratti le sponde in erosione confinano con terreni agricoli o piantagioni (rendendo la perdita di superficie un danno economico), mentre altrove confinano con aree boscate o incolte che, pur avendo valore ecologico, non sono sfruttate economicamente. Sono presenti anche alcune opere antropiche localizzate: ad esempio difese spondali in massi posizionate per proteggere punti critici, sebbene spesso in maniera discontinua e non sempre efficace. Nei pressi di centri abitati o infrastrutture (come più a valle verso Latisana, dove vi sono ponti stradali e ferroviari), gli argini artificiali risultano più continui e alti, mentre nel tratto di Ronchis le arginature, dove presenti, sono più arretrate, lasciando ancora spazio a evoluzioni laterali del fiume. Questa graduale intensificazione delle opere di contenimento rende il contesto di Ronchis particolarmente interessante per il monitoraggio geomatico: qui si possono osservare le dinamiche naturali delle sponde in un contesto relativamente libero, ma al tempo stesso valutare gli effetti delle prime pressioni antropiche (uso agricolo del suolo, difese sparse, ecc.) sul comportamento del fiume.

3.3. I siti di monitoraggio (TF01–TF07): criteri di selezione, morfologia e vulnerabilità

Nell'ambito di questa ricerca sono stati individuati sette siti di test (TF01–TF07) all'interno di una macroarea del fiume Tagliamento a Ronchis, oggetto di monitoraggio geomorfologico delle dinamiche spondali (Fig. 4). Ciascun sito corrisponde a una porzione di sponda fluviale o di alveo attivo ritenuta significativa per i processi erosivi in atto.

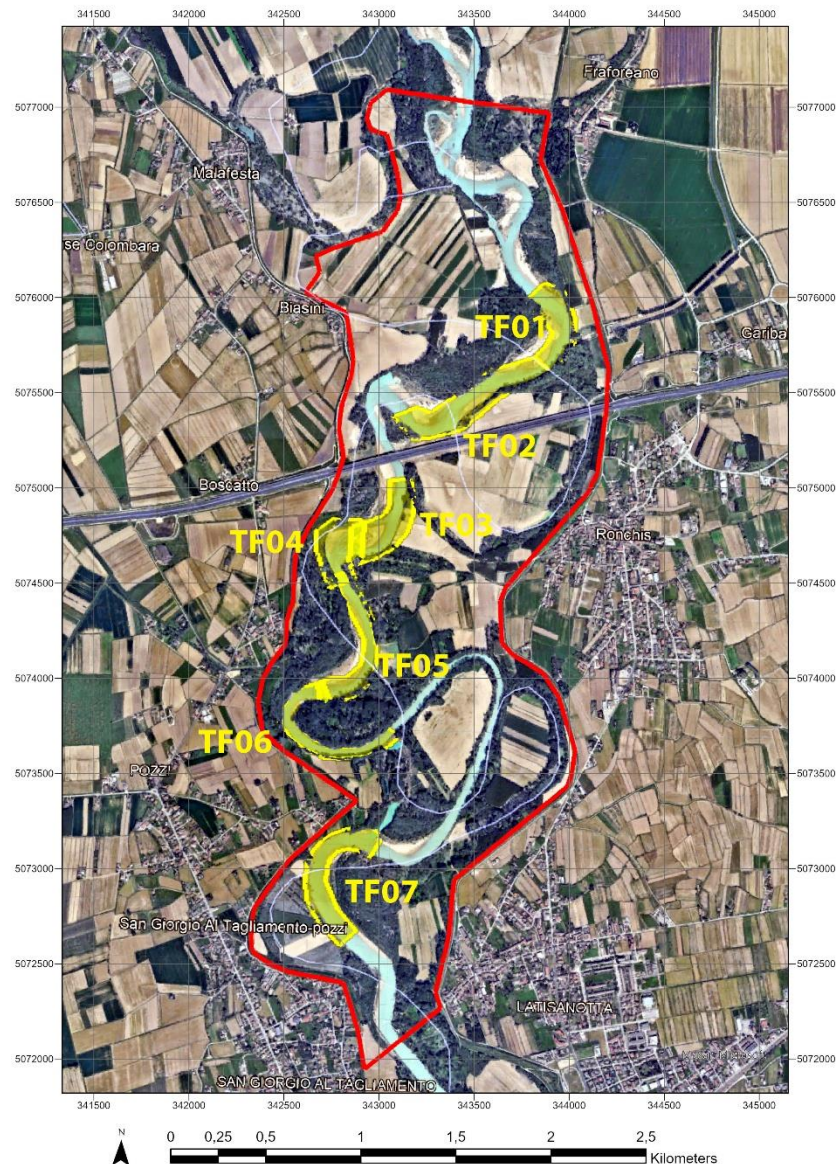


Fig. 4 . Inquadramento della macroarea e dei TF

La selezione di questi test field è avvenuta sulla base di criteri geomorfologici, ambientali e gestionali ben precisi, mirati a coprire la varietà di situazioni presenti nel tratto di studio. In particolare, si è voluto includere:

- siti con forte dinamica erosiva attiva, ad esempio tratti di sponda concava di meandro soggetti ad arretramento rapido. Queste aree presentano evidenti segni di crolli recenti della sponda e traslazione laterale dell'alveo, e sono state scelte perché rappresentano la massima espressione

della dinamica fluviale locale. Monitorare tali punti fornisce informazioni sulla velocità di erosione e sui volumi di sedimento mobilitati;

- siti con diversa copertura vegetale riparia: alcune aree di test includono sponde fortemente vegetate da bosco ripariale, altre invece sponde più spoglie o colonizzate solo da vegetazione erbacea. La vegetazione riparia densa tende, infatti, a rafforzare il terreno con le radici e a dissipare l'energia della corrente, riducendo l'erosione, mentre nei tratti privi di copertura arborea le sponde ghiaiose o sabbiose risultano più vulnerabili agli effetti della corrente. La scelta dei siti ha dunque tenuto conto della diversità ecologica della fascia riparia, includendo sia segmenti protetti sia segmenti esposti, in modo da documentare entrambe le condizioni;
- siti con differente contesto di uso del suolo e vulnerabilità antropica: è stato ritenuto importante monitorare sia aree dove un'eventuale regressione della sponda avrebbe impatto su terreni agricoli (alta vulnerabilità antropica ed economica), sia aree in cui l'arretramento erosivo interessa principalmente zone naturali o incolte (bassa vulnerabilità, ma interesse ambientale). Ad esempio, TF03 e TF07 sono collocati in prossimità di campi coltivati: qui l'avanzamento dell'erosione fluviale può sottrarre superficie utile alle aziende agricole locali, e in passato sono già stati effettuati piccoli interventi di contenimento (come massicciate sparse) per cercare di mitigare il fenomeno. Questi siti testimoniano la pressione antropica sul fiume: la convivenza tra fiume mobile e attività umane richiede monitoraggio per prevenire danni e pianificare eventuali misure di adattamento. Al contrario, siti come TF02 ricadono lungo una sponda fiancheggiata da boschi poco utilizzati: in tal caso l'erosione, pur intensa, non minaccia immediatamente beni economici, ma offre l'opportunità di osservare il comportamento del fiume in modo più "libero" da vincoli antropici. Includere entrambe le situazioni consente di capire come la presenza o assenza di pressione antropica influenzi la morfodinamica.

Ogni sito di monitoraggio copre tipicamente qualche centinaio di metri di sponda fluviale e relativo fronte d'alveo. La distribuzione spaziale dei TF01–TF07 copre parzialmente il tratto di Ronchis, alternando la sponda sinistra (Friuli, in provincia di Udine) e la sponda destra (Veneto, in provincia di Venezia). In particolare, alcuni siti si trovano in sinistra idrografica all'interno del comune di Ronchis, mentre altri sono in destra idrografica sul territorio del limitrofo comune veneto (San Michele al Tagliamento). Questa disposizione bilaterale consente di analizzare eventuali differenze di comportamento erosivo tra le due sponde, legate sia all'andamento planimetrico del fiume sia a differenze nelle opere di difesa (la sponda veneta e quella friulana possono avere interventi differenti per storia amministrativa). Dal punto di vista morfologico, i siti coprono varie situazioni: anse marcate, tratti più rettilinei o di transizione tra anse.

In termini di vulnerabilità ambientale e gestionale, la scelta di questi siti risponde anche all'esigenza di individuare aree dove il monitoraggio possa supportare futuri interventi di gestione del territorio. Alcuni dei siti ad alta erosione vicino a terreni agricoli possono richiedere in futuro misure di mitigazione (riforestazione delle sponde, delocalizzazione di attività dalla fascia fluviale), e i dati geomatici raccolti in questo lavoro forniranno una base scientifica per valutare l'efficacia di tali soluzioni. Allo stesso modo, i siti in area naturale (boscata) fungono da riferimento per valutare la naturalità della dinamica: ad esempio, misurando quanta parte della sponda arretra in un anno senza interventi umani, si potrà confrontare con i tratti dove l'uomo è intervenuto, per stimare se le difese attuali rallentano davvero l'erosione o la spostano semplicemente più a valle.

4. Materiali e metodi

4.1. Rilievi UAV: pianificazione voli, sensore multispettrale, nRTK, rete CP

L'impiego di SAPR per finalità di rilievo fotogrammetrico e telerilevamento ambientale ha conosciuto un'espansione significativa negli ultimi anni, trovando numerose applicazioni anche nel monitoraggio delle dinamiche fluviali. Il presente studio ha previsto l'impiego operativo sistematico di un drone DJI-M3M (DJI Mavic 3 Multispectral), equipaggiato con sensore RGB e multispettrale, in combinazione con tecnologie di posizionamento GNSS differenziale nRTK (*network Real Time Kinematic*) e una rete di CP (*Control Point*) per la verifica della georeferenziazione diretta. In questa sezione si descrivono nel dettaglio le modalità operative, le scelte tecniche e le implicazioni metodologiche dei rilievi eseguiti lungo i sette sub-tratti del Tagliamento.

- **Pianificazione dei voli e riferimenti normativi**

Tutti i voli sono stati eseguiti in conformità al regolamento europeo EU 2019/947 e alle direttive ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) per l'utilizzo dei droni in operazioni a basso rischio (categoria "Open"), previa consultazione del portale D-Flight per la verifica di eventuali *No Fly Zones* e limitazioni altimetriche (Fig. 5).

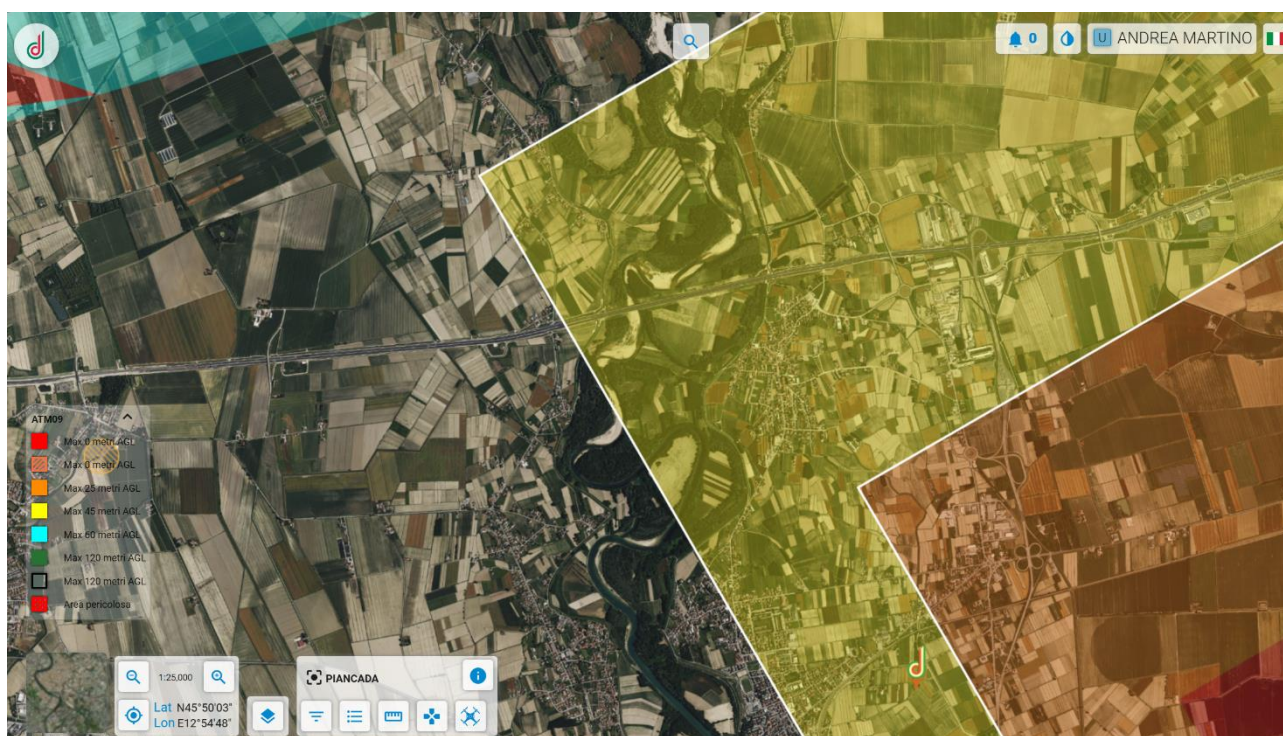


Fig. 5. Area di volo sul portale D-Flight

La pianificazione è stata eseguita tramite DJI Pilot 2 (Fig. 6), con schema a strisciate incrociate (*cross-grid flight plan*) per ottenere una copertura completa del terreno e migliorare la qualità delle ricostruzioni tridimensionali. Ogni missione prevedeva acquisizioni nadirali e oblique (angolo 45°), con sovrapposizione longitudinale e trasversale rispettivamente pari a 80% e 70%. Le missioni sono state condotte in condizioni meteo favorevoli (assenza di vento), adottando una quota di volo uniforme di 40 metri dal suolo, compatibilmente con la normativa ENAC sopracitata e la necessità di garantire una risoluzione al suolo adeguata agli scopi prefissati (GSD (*Ground Sample Distance*) di 1,07 cm/pixel per il sensore RGB e di 1,82 cm/pixel per i sensori multispettrali).

Le aree di decollo sono state selezionate in funzione dell'accessibilità e della visibilità diretta dell'intera zona di volo, rispettando le distanze minime previste dal regolamento rispetto ad infrastrutture, centri abitati e vie di comunicazione. I primi voli sono stati programmati prima del periodo autunnale, in cui storicamente aumenta la probabilità di regimi di piena rilevanti, al fine di consentire analisi di tipo pre-post evento.



Fig. 6. Piano di volo parziale eseguito sul TF05

• Caratteristiche del sistema di acquisizione

Il DJI-M3M combina due sistemi di sensori:

- una fotocamera RGB CMOS 4/3" da 20 MP, con otturatore meccanico e lente f/2.8;
- quattro sensori multispettrali indipendenti da 5 MP ciascuno (Green: 560 nm $\pm$ 16 nm; Red: 650 nm $\pm$ 20 nm; Red Edge: 730 nm $\pm$ 20 nm; Near-Infrared: 860 nm $\pm$ 26 nm).

Il sensore è assistito da un radiometro solare integrato (Fig. 7), posizionato sulla parte superiore del drone, che rileva l'irradianza istantanea per normalizzare le immagini acquisite in volo. Tuttavia, in ciascuna missione è stato impiegato anche un pannello di calibrazione della riflettanza MicaSense Calibrated Reflectance Panel 2 (Fig. 8), con certificazione di riflettanza spettrale nota, fotografato da 0,8-1,2 m di quota prima e dopo ogni volo. Tale ridondanza ha permesso di raffinare la calibrazione radiometrica dei dati e migliorare la comparabilità tra campagne diverse.

Secondo Aasen et al. (2018), la calibrazione combinata (irradianza + pannello) è fondamentale per garantire la robustezza dei dati multispettrali, soprattutto in ambienti eterogenei come gli alvei fluviali [49]. Studi analoghi evidenziano come l'accuratezza radiometrica ottenuta con tale approccio sia essenziale per l'affidabilità degli indici NDVI, GNDVI e NDRE in condizioni di copertura vegetale discontinua [50][51].

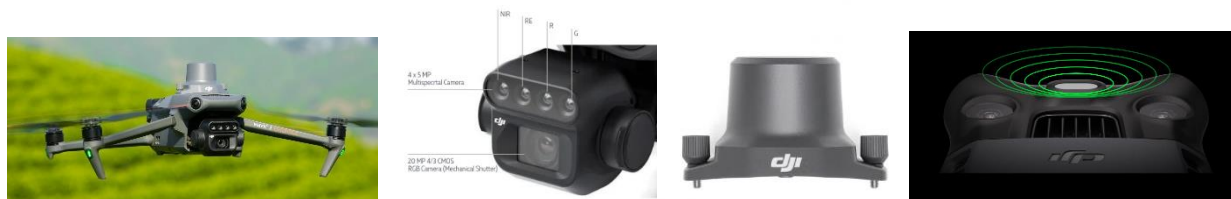


Fig. 7 DJI-M3M, sensori, ricevitore nRTK, radiometro solare



Fig. 8. Pannello di calibrazione della riflettanza MicaSense Calibrated Reflectance Panel 2

- **Georeferenziazione diretta con sistema nRTK**

Il drone è dotato di ricevitore GNSS RTK integrato, operante in modalità nRTK. Durante tutte le missioni, il collegamento alla rete Hexagon SmartNet Italia (*mountpoint* IMAX3-RDN-MSM) è stato stabile e continuo, con precisione centimetrica raggiunta in tempo reale pari a $\pm 3\text{-}4$ cm in planimetria e ± 5 cm in altimetria, secondo i log forniti dal controller.

La georeferenziazione diretta consente l'attribuzione automatica delle coordinate assolute ad ogni immagine, riducendo l'onere di impiego dei GCP e aumentando l'efficienza operativa. Teppati Losè et al. (2022) hanno dimostrato come l'impiego di nRTK combinato a riprese oblique migliori sensibilmente la qualità delle superfici 3D, specialmente in ambienti con elevati dislivelli laterali come le sponde fluviali [52].

L'accuratezza del posizionamento diretto è stata validata anche attraverso il confronto con punti di controllo rilevati a terra, come discusso nel paragrafo successivo.

- **Rete di CP**

Per ciascun volo sono stati collocati 4-5 CP (Fig. 9), posizionati sulla sponda accessibile e rilevati mediante ricevitore GNSS Stonex S900A, anch'esso connesso alla rete Hexagon SmartNet Italia (per coerenza è stato scelto lo stesso *mountpoint* IMAX3-RDN-MSM) e operante in modalità nRTK. I CP sono stati selezionati in aree stabili, facilmente riconoscibili nelle immagini e non ancora soggette a variazioni morfologiche.

Come accennato, la distribuzione dei CP non è stata uniforme su entrambe le sponde a causa di motivi logistici: le campagne di rilievo aerofotogrammetrico e GNSS sono state svolte in autonomia,

la profondità del fiume e la conformazione delle sponde ne impedisce l'attraversamento in maniera sicura e lo spostamento da una sponda all'altra su strada avrebbe implicato tempi di svolgimento del rilievo eccessivamente lunghi, nonché il posizionamento momentaneo di attrezzatura in modo non sorvegliato. Ciò ha limitato il posizionamento dei punti di controllo alla sola sponda di decollo. Nonostante tale asimmetria, la presenza dei CP ha consentito di validare l'accuratezza dei dati.

Come dimostrato da James et al. (2017) e Tonkin & Midgley (2016), anche una distribuzione parziale dei CP, può fornire risultati accettabili nei rilievi di aree semi-contenute, come gli alvei fluviali arginati [52][53][54].

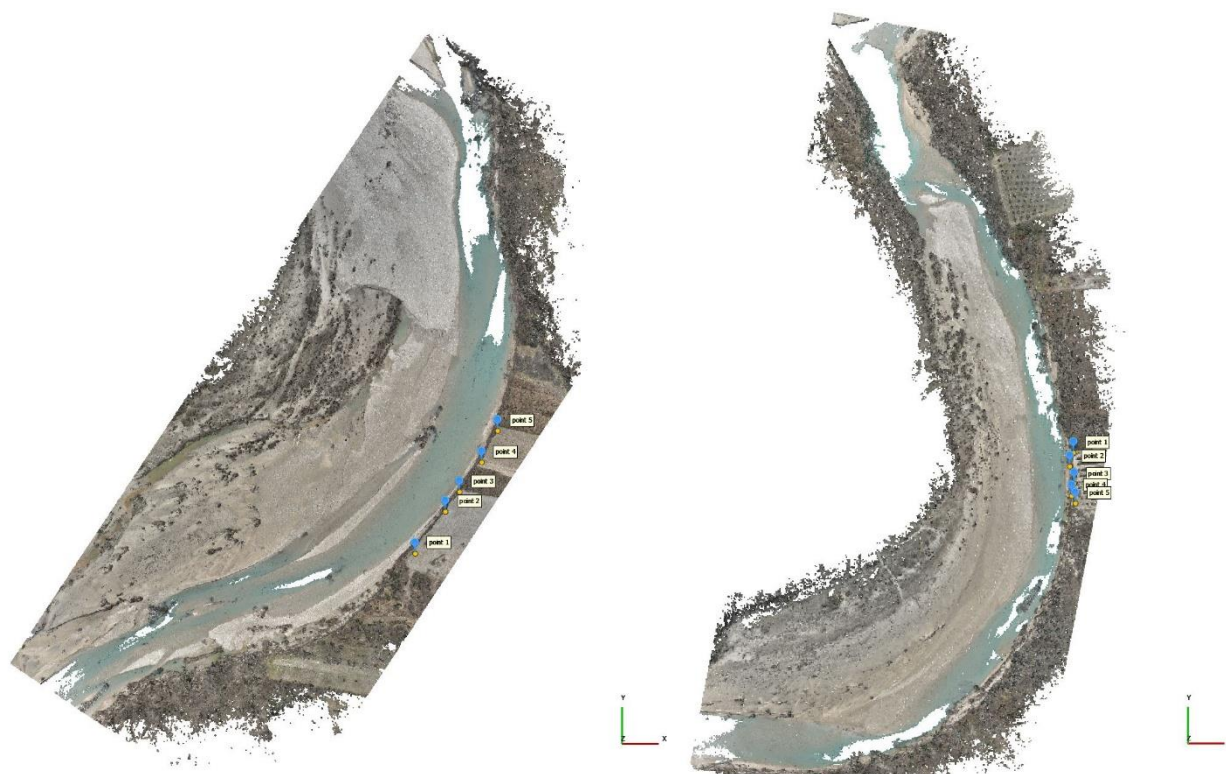


Fig. 9. Disposizione dei CP nelle campagne di rilievo del TF03 e del TF05 in data 11/02/2025

• Valutazione complessiva della metodologia

I rilievi UAV eseguiti nel corso dei tre anni sui 7 *test field* (Tab. 1) hanno garantito una copertura spaziale e ad alta risoluzione (<2 cm GSD), consentendo la generazione di nuvole di punti dense, DSM e ortofoto da impiegare nei successivi processi di *change detection* morfologica e analisi della copertura vegetazionale. I principali punti di forza della metodologia applicata sono:

- possibilità di confronti multitemporali pre-post piena;
- tempi di acquisizione ridotti e tecnologia relativamente economica;
- affidabilità della georeferenziazione diretta;
- precisione metrica sufficiente ad analisi a scala 1:200;
- capacità di discriminazione spettrale della vegetazione e del suolo nudo;
- replicabilità della procedura in contesti analoghi.

Tra le principali criticità si segnalano:

- dipendenza da condizioni meteorologiche e di segnale GNSS;
- necessità di calibrazione della riflettanza;
- rispetto delle normative ENAC;
- difficoltà nel posizionamento uniforme dei CP in ambienti fluviali complessi.

Nonostante ciò, la sinergia tra fotogrammetria UAV, posizionamento nRTK e sensoristica multispettrale rappresenta oggi una delle soluzioni più efficaci e accessibili per il monitoraggio geomorfologico e ambientale ad alta risoluzione di aree fluviali soggette a rapido cambiamento.

<i>TestField</i>	<i>n°</i>	<i>Data</i>	<i>Ora</i>	<i>Perimetro (Km)</i>	<i>Superficie (Ha)</i>	<i>Foto RGB (n°)</i>	<i>Foto multispettrali (n°)</i>
TF01	Uno	2023/11/12	15:19-16:48	1,26	7,13	1643	6572
	Due	2024/04/28	11:40-13:35	1,26	7,13	1956	7824
TF02	Uno	2023/12/09	10:59-12:56	1,96	12,40	2284	9136
	Due	2024/05/01	10:56-12:54	1,96	12,40	2626	10504
TF03	Uno	2023/09/09	12:26-14:31	1,35	8,40	1459	5836
	Due	2024/02/21	10:08-12:05	1,35	8,40	1618	6472
	Tre	2025/02/11	10:44-12:36	1,35	8,40	1756	7024
TF04	Uno	2023/09/09	17:28-19:01	1,13	7,15	1277	5108
TF05	Uno	2023/09/10	15:27-17:37	1,89	7,95	2051	8204
	Due	2024/02/21	15:01-17:04	1,89	7,95	2018	8072
	Tre	2025/02/11	13:01-14:47	1,89	7,95	1707	6828
TF06	Uno	2023/09/11	17:18-19:07	2,10	7,50	2089	8356
TF07	Uno	2023/10/28	15:00-17:09	1,85	9,71	2173	8692
	Due	2024/05/01	16:44-18:14	1,85	9,71	1361	5444
	Tre	2025/02/16	11:03-13:13	1,85	9,71	1996	7984

Tab. 1. Elenco dei rilievi aerofotogrammetrici eseguiti nel triennio 2023-2025

4.2. Elaborazione fotogrammetrica SfM: nuvola di punti, DEM, ortofoto

Il processo di elaborazione fotogrammetrica è stato effettuato utilizzando il software Agisoft Metashape Professional (versione 2.2.0 build 19853), software di SfM leader nel settore che consente una gestione accurata e rigorosa dei dati.

Le immagini RGB e multispettrali acquisite sono state inserite nel software nella forma di “*Multi-camera System*” composto da cinque distinte fotocamere corrispondenti alla camera RGB e alle quattro camere multispettrali. Questa modalità permette una gestione ottimizzata delle immagini multispettrali, facilitando l’elaborazione dei dataset. Successivamente, le foto contenenti il pannello di calibrazione radiometrica MicaSense Calibrated Reflectance Panel 2 sono state isolate e mascherate manualmente per ogni singola banda (Fig. 10), al fine di garantire una corretta calibrazione radiometrica dei dataset acquisiti [55], che, come accennato precedentemente, è avvenuta anche utilizzando il sensore radiometrico a bordo di DJI-M3M.

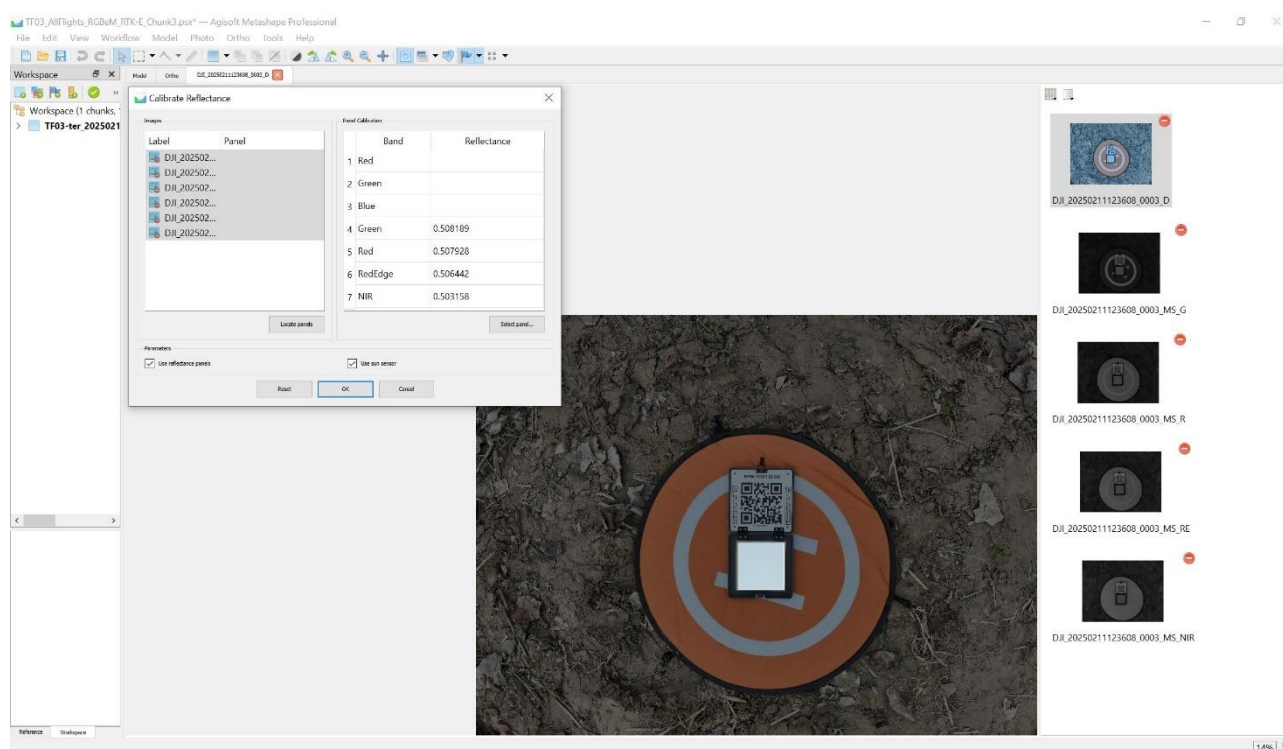


Fig. 10. Il processo di calibrazione radiometrica su Agisoft Metashape

Le coordinate dei centri di presa, acquisite direttamente dal ricevitore del drone in modalità nRTK nel sistema RDN2008 (EPSG:6706) e trascritte nei metadati delle fotografie, sono state esportate dal software e convertite nel sistema cartografico nazionale italiano RDN2008 / UTM zone 33N (EPSG:6708) utilizzando il software ufficiale ConveRgo (versione 2.05) dell’IGM (Istituto Geografico Militare), impiegando i grigliati geoidici ufficiali (.gk2). Questa trasformazione segue la normativa vigente sulla cartografia tecnica nazionale e garantisce la massima coerenza spaziale e metrica con i dati ufficiali (Decreto 10 novembre 2011, G.U. n.48, 27 febbraio 2012).

Dopo aver aggiornato le coordinate all’interno del software Metashape, la fase di orientamento delle immagini (“*Align Photos*”) è stata effettuata selezionando il parametro “*Accuracy: Highest*”, e attivando le opzioni avanzate “*Guided Image Matching*” e “*Adaptive Camera Model Fitting*”. Tali opzioni permettono di migliorare significativamente la precisione del matching fotogrammetrico, specialmente in aree geometricamente complesse o con acquisizioni oblique, adattando dinamicamente i parametri interni della camera durante l’orientamento stesso [56][57].

In seguito è stata eseguita l’ottimizzazione dei parametri dell’orientamento interno della camera tramite il comando “*Optimize Camera Alignment*”, selezionando i parametri f , c_x , c_y , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 ,

p2 (lunghezza focale, coordinate del punto principale, coefficienti di distorsione radiale e tangenziale) e attivando le opzioni "*Estimate Tie Point Covariance*" (per il calcolo delle matrici di covarianza dei *Tie Points* per quantificarne l'incertezza proiettiva) e "*Fit Additional Corrections*" (per compensare distorsioni residuali non considerate dai coefficienti radiali e tangenziali di base, consigliato in caso di georeferenziazione diretta). Questo approccio permette di compensare gli errori sistematici derivanti dalle distorsioni e da imprecisioni nelle coordinate GNSS acquisite direttamente dal ricevitore GNSS dell'UAV, migliorando così l'accuratezza complessiva del modello finale [57][58].

La procedura "*Gradual Selection*" è stata utilizzata per effettuare una eliminazione rigorosa dei *Tie Points*, eliminando sequenzialmente punti con valori elevati di "*Reconstruction Uncertainty*", "*Projection Accuracy*" e "*Reprojection Error*", secondo una strategia consolidata per ottenere una nuvola di punti più affidabile dal punto di vista metrico e meno rumorosa [57]. Al termine della procedura è necessario verificare gli indicatori di precisione derivanti dalla georeferenziazione diretta e accertarsi che rispettino i requisiti progettuali. Poiché l'elaborato opera alla scala di 1:200, i risultati conseguiti soddisfano gli standard di accuratezza stabiliti (Tab. 2).

TestField	n°	Tie Points (n°)	Filtered Point Cloud (n°)	Precisione (Est/Nord/Quota) (m)	Precisione (Modulo) (m)
TF01	Uno	1669680	265249627	0,010281 / 0,010709 / 0,014220	0,020557
	Due	1929883	280155835	0,009190 / 0,010077 / 0,016245	0,021211
TF02	Uno	2540347	477274667	0,010973 / 0,010536 / 0,016013	0,022087
	Due	2943887	519066710	0,012555 / 0,012812 / 0,032098	0,036770
TF03	Uno	1876563	319346946	0,015736 / 0,014481 / 0,026770	0,034263
	Due	1919895	432480072	0,011878 / 0,014088 / 0,025314	0,031310
	Tre	1778642	353492487	0,016307 / 0,013912 / 0,015841	0,026653
TF04	Uno	1777732	278546557	0,012435 / 0,014074 / 0,035228	0,039921
TF05	Uno	2739943	298902715	0,014264 / 0,014922 / 0,033991	0,039768
	Due	2286250	437738273	0,016232 / 0,019167 / 0,026597	0,036583
	Tre	1748033	365152360	0,010798 / 0,012917 / 0,012727	0,021105
TF06	Uno	2441889	290730567	0,012134 / 0,014613 / 0,029993	0,035502
TF07	Uno	2771515	208815500	0,009443 / 0,013364 / 0,026824	0,031422
	Due	1013555	217246983	0,011680 / 0,015584 / 0,034845	0,039919
	Tre	1690972	265325467	0,013523 / 0,025452 / 0,027245	0,039661

Tab. 2. Nuvole di punti e precisione rispetto ai centri di presa nRTK nell'orientamento assoluto

La nuvola di punti è stata generata impostando i parametri di qualità su "*Ultra High*" e di *Depth filtering* su "*Mild*", in modo da produrre un modello dettagliato e fedele alla morfologia reale. Le nuvole di punti generate sono state successivamente duplicate e, sulla copia, filtrate eliminando i punti con confidence 0-2 (filtro "*Filter by Confidence*" di Metashape, che scarta i punti ritenuti meno affidabili sulla base del ridotto numero di *depth-maps* concordanti ≤ 2 che ne confermano la posizione), e validate utilizzando i CP, rilevati a terra mediante GNSS Stonex S900A in modalità nRTK, al fine di valutare la precisione assoluta della georeferenziazione diretta [52][59] (Tab. 3).

TestField	n°	CP1 / CP2 / CP3 / CP4 / CP5 (m)	Media (m)
TF01	Uno	0,034647 / 0,013943 / 0,040729 / 0,032548 / 0,018399	0,028053
	Due	0,035467 / 0,029506 / 0,029656 / 0,042314 /	0,035828
TF02	Uno	0,025371 / 0,005938 / 0,054329 / 0,031098 /	0,029184
	Due	0,014725 / 0,018943 / 0,035893 / 0,028672 / 0,047601	0,029167
TF03	Uno	0,029671 / 0,036869 / 0,050313 / 0,019375 /	0,034057
	Due	0,040189 / 0,026984 / 0,014904 / 0,039613 / 0,041094	0,030423
	Tre	0,038621 / 0,030867 / 0,003042 / 0,015287 /	0,021954
TF04	Uno	0,030478 / 0,037728 / 0,050143 / 0,019947 /	0,034574
TF05	Uno	0,019846 / 0,030981 / 0,041302 / 0,039997 / 0,037921	0,034009
	Due	0,009854 / 0,028639 / 0,010934 / 0,008376 /	0,014451
	Tre	0,042539 / 0,032991 / 0,027891 / 0,016738 / 0,038998	0,031831
TF06	Uno	0,011498 / 0,040392 / 0,049102 / 0,029968 / 0,04917	0,036026
TF07	Uno	0,035867 / 0,011793 / 0,035627 / 0,037598 /	0,030221
	Due	0,024894 / 0,043917 / 0,040132 / 0,039728 / 0,050042	0,039743
	Tre	0,029982 / 0,029581 / 0,020455 / 0,017598 / 0,021988	0,023921

Tab. 3. Valori di precisione dei CP

Successivamente, è stata applicata la funzione "*Colorize Point Cloud*" per assegnare ai punti la colorazione RGB derivata dalle immagini acquisite. Questa operazione rende il modello più facilmente interpretabile dal punto di vista qualitativo e visivo e ne permette l'esportazione nella modalità "*True Color*".

La generazione del Modello Digitale di Elevazione (DEM) è stata effettuata utilizzando la nuvola di punti filtrata, ottenendo una risoluzione spaziale finale pari a 2 cm/pixel, ideale per analisi geomorfologiche dettagliate in contesti fluviali complessi. Non è stata applicata una classificazione automatica delle superfici all'interno di questo software, in quanto il contesto analizzato, caratterizzato da una complessa e disomogenea copertura vegetale, presenza di arbusti, boschi e coltivazioni, avrebbe comportato una classificazione non sufficientemente accurata e coerente. Studi recenti confermano la difficoltà della classificazione automatica in ambienti fluviali fortemente eterogenei e con coperture variabili, suggerendo in questi casi approcci manuali o semi-automatici più affidabili [60][61][62].

Analogamente, l'ortofoto finale con risoluzione spaziale di 2 cm/pixel è stata generata tramite il comando "*Build Orthomosaic*", garantendo un'accurata ortorettifica delle immagini RGB e multispettrali in base al DEM precedentemente prodotto.

Per l'analisi multispettrale è stato impiegato il comando "*Set Raster Transform*" per calcolare sia l'indice NDVI, secondo la formula classica sia l'indice NDWI nelle forme proposte da McFeeters (1996),

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} \quad (2)$$

ottenendo così due indicatori complementari del vigore fotosintetico e del contenuto idrico superficiale. Entrambe le ortofoto sono state stilizzate con una palette cromatica personalizzata, suddivisa in classi di 0,1 nell'intervallo 0-1, per consentire una classificazione visiva immediata e rigorosa delle principali coperture vegetazionali, del suolo nudo e dei corpi idrici [63]. La disponibilità di NDVI e NDWI ad alta risoluzione spaziale permette, da un lato, di individuare con precisione centimetrica i gradienti di stress o vigore nella vegetazione, e, dall'altro, di mappare micro-risagni, canali effimeri e zone sature, migliorando notevolmente la modellistica idrologica e la gestione del rischio idraulico. L'integrazione di entrambi gli indici su dataset ad alta frequenza temporale e alta definizione offre una duplice visione, una per la salute della biomassa e una per lo stato idrico, che consente decisioni rapide, puntuali e basate su dati quantitativi oggettivi.

Infine, tutti i prodotti elaborati (nuvola di punti RGB e NDVI, DEM, ortofoto RGB, NDVI ed NDWI) sono stati esportati in formati interoperabili (LAS, GEOTiff), completi di metadati e pronti per l'utilizzo diretto in software di analisi, modellistica e GIS.

4.3. Classificazione automatica della nuvola di punti (acqua, terreno, vegetazione)

Come anticipato nel capitolo precedente, la classificazione della nuvola di punti è stata effettuata attraverso l'elaborazione dell'indice di vegetazione NDVI, calcolato direttamente all'interno del software Agisoft Metashape. Il metodo adottato ha previsto la trasformazione dei valori radiometrici acquisiti tramite sensore multispettrale del DJI-M3M in valori di NDVI. In fase di post-elaborazione, è stata definita una *raster transformation* personalizzata segmentata in classi di ampiezza 0,1 nel range compreso tra 0 e 1, con l'obiettivo di ottenere una mappatura fine e dettagliata delle differenti condizioni della copertura vegetale.

Sebbene l'approccio basato su NDVI possa apparire metodologicamente semplice, esso ha dimostrato una notevole efficacia nel distinguere le principali classi presenti lungo le sponde fluviali: acqua (valori prossimi o inferiori a 0), suolo nudo ($\text{NDVI} < 0,2$), vegetazione rada (NDVI tra 0,2 e 0,4), vegetazione attiva (NDVI tra 0,4 e 0,6), e vegetazione densa e sana ($\text{NDVI} > 0,6$). Questa segmentazione, pur empirica, si è rivelata particolarmente efficace nel contesto oggetto di studio, caratterizzato da un'elevata eterogeneità ambientale e da condizioni complesse quali arbusteti spontanei, colture temporanee e porzioni di bosco ripariale.

Numerosi studi confermano la validità di approcci *NDVI-based* per il mascheramento vegetato/non vegetato e per il monitoraggio del vigore o della copertura frazionaria all'interno della stessa classe di copertura in ambienti fluviali. Duffy et al. (2018) e Aasen et al. (2018) mostrano come la fotogrammetria UAV multispettrale, se integrata con indici di vegetazione ad alta risoluzione, sia in grado di produrre mappe tematiche coerenti anche in ambienti con elevato disturbo spettrale [49][63]. In particolare, l'utilizzo di soglie NDVI personalizzate e ottimizzate su base locale consente di ridurre notevolmente gli errori di tipici delle classificazioni automatiche in aree riparie [64].

Nel presente lavoro, l'applicazione diretta della *raster transformation* su ortofoto e nuvole di punti (Fig. 11) ha permesso la derivazione di prodotti classificati ad alta risoluzione spaziale, senza necessità di addestramento supervisionato o segmentazione. Tale approccio risulta vantaggioso in particolare per l'individuazione di aree di vegetazione a rischio o soggette a regressione dovuta a fenomeni di erosione laterale delle sponde. In fase di piena, infatti, le porzioni di vegetazione con radicazione marginale (NDVI compreso tra 0,3 e 0,5) tendono a essere erose in via prioritaria, rappresentando un indicatore precoce della vulnerabilità spondale. La disponibilità di serie temporali annuali (2023–2025) consente inoltre di monitorare il degrado o la ricrescita della vegetazione spondale, e di individuare pattern ricorrenti di perdita o avanzamento della copertura verde.

L'utilizzo dell'NDVI come criterio di classificazione risulta inoltre altamente replicabile, compatibile con piattaforme diverse (fotogrammetria UAV, Sentinel-2) e integrabile in flussi di lavoro automatici anche su piattaforme *cloud* (es. GEE), rendendolo uno strumento potente per il monitoraggio geomorfologico e ambientale su scala locale e regionale [65][66].

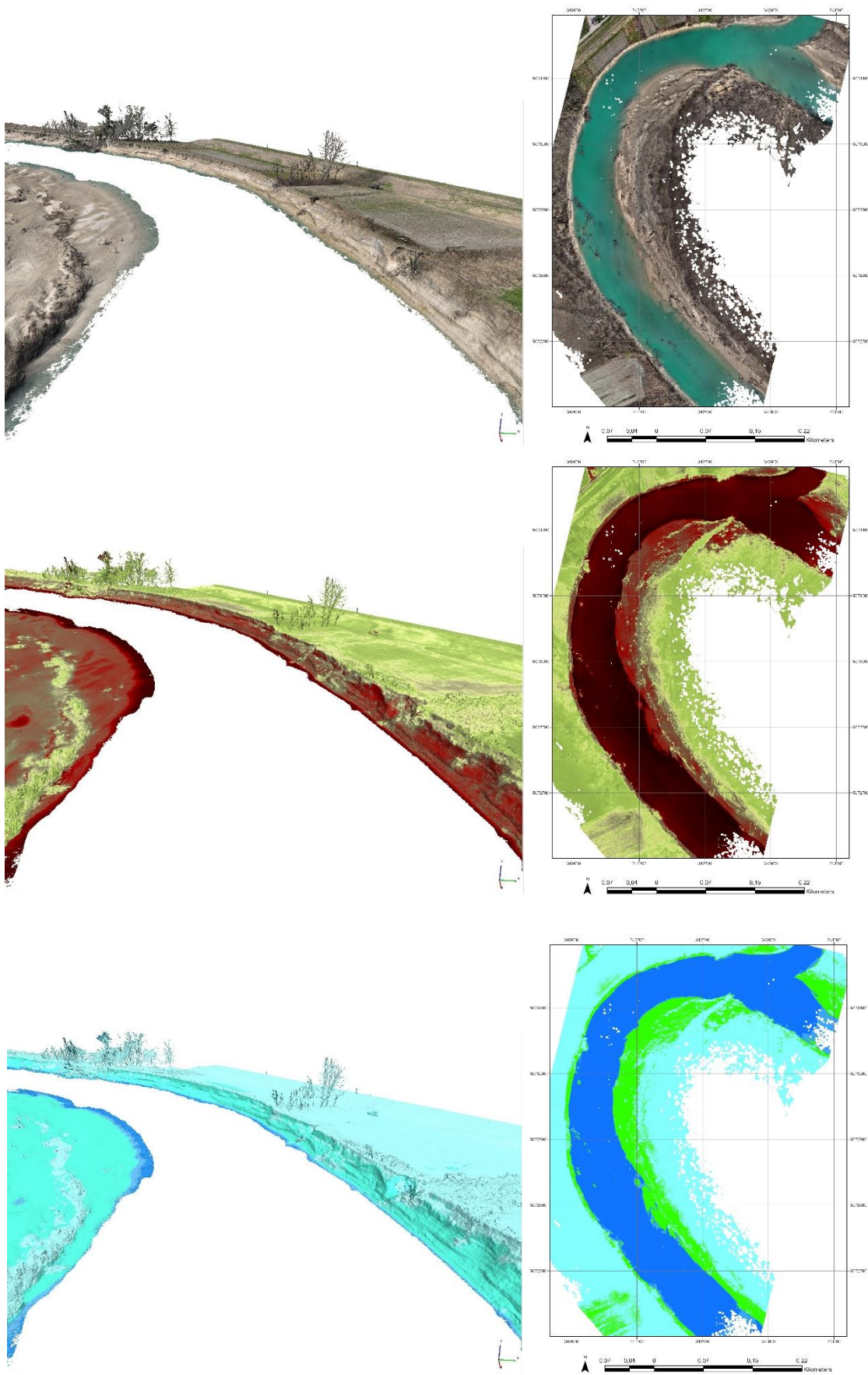


Fig. 11. Nuvole di punti e ortofoto in visualizzazione True Color, NDVI, NDWI

4.4. Analisi delle nuvole di punti

Le nuvole di punti fotogrammetriche costituiscono uno degli strumenti più efficaci per il monitoraggio dettagliato delle dinamiche fluviali, consentendo di valutare i cambiamenti morfologici tridimensionali della superficie terrestre con elevata precisione spaziale e temporale [13][19]. Nel presente lavoro, per i 7 *test field*, è stata effettuata un'analisi delle variazioni morfologiche delle sponde del Tagliamento soggette ad erosione, basata sulle nuvole di punti generate tramite tecnica fotogrammetrica, utilizzando il software CloudCompare (versione 2.13.2).

L'obiettivo principale dell'analisi era quello di quantificare in maniera accurata le variazioni orizzontali (planimetriche) delle sponde fluviali in seguito ad eventi idrologici significativi, concentrandosi in particolare sull'arretramento erosivo laterale delle sponde alte. A differenza dei comuni contesti geomorfologici dove prevalgono variazioni verticali (abbassamenti o innalzamenti del terreno), nel caso specifico delle sponde del Tagliamento presso Ronchis, le dinamiche dominanti sono caratterizzate da arretramenti laterali di notevole entità (fino a 100 metri) e spesso accompagnati da cambiamenti radicali localizzati di geometria verticale della sponda (ad esempio crolli improvvisi di porzioni di sponda verticale).

In letteratura, l'approccio standard suggerito per analisi tridimensionali è il metodo M3C2, introdotto da Lague et al. (2013), che consente un confronto robusto tra nuvole di punti tramite calcolo di distanze normali alla superficie locale, e quindi in grado di quantificare variazioni tridimensionali anche complesse [13]. Tuttavia, nel presente caso, le prove condotte preliminarmente con M3C2 hanno mostrato problematiche significative nell'evidenziare in maniera affidabile la reale entità dell'erosione laterale delle sponde.

Le ragioni principali della mancata efficacia di M3C2 in questo studio sono da attribuire alla natura estrema e alla scala delle variazioni osservate. L'algoritmo M3C2, infatti, si basa sull'assunzione che le superfici confrontate presentino geometrie comparabili localmente, con variazioni modeste tra le epoche considerate [53]. Nel caso analizzato, invece, le sponde verticali del Tagliamento hanno subito arretramenti e cambi morfologici così significativi da rendere problematico il confronto diretto tra le due epoche, con difficoltà nell'individuazione di normali affidabili, soprattutto in condizioni in cui la sponda si è arretrata interamente, lasciando spazi vuoti nelle aree precedentemente occupate [33].



Fig. 12. Caso di arretramento spondale nell'epoca 2023-2025 del TF03 da uguale punto di vista

Alla luce di queste difficoltà, si è optato per un approccio alternativo che garantisca una maggiore affidabilità e precisione nel quantificare i fenomeni erosivi in atto.

L'approccio scelto, dunque, si è basato sulla combinazione di due tecniche complementari offerte da CloudCompare: l'analisi delle distanze (C2C) con successiva separazione delle componenti spaziali (X, Y e Z), e la successiva verifica tramite estrazione di sezioni planimetriche e trasversali (*slicing*).

L'analisi C2C rappresenta un metodo semplice e diretto per quantificare variazioni tra nuvole di punti, calcolando la distanza euclidea tra ciascun punto della nuvola “di confronto” e il punto più vicino (*nearest neighbor*) della nuvola “di riferimento” [67][68]. Sebbene la distanza euclidea abbia alcune limitazioni, principalmente legate al fatto che non necessariamente corrisponde alla vera distanza ortogonale alla superficie [13], nel presente caso, data l'entità delle variazioni laterali, il metodo si è dimostrato robusto e più pratico rispetto a M3C2.

Nel presente studio, dopo l'importazione in CloudCompare sia delle nuvole di punti fotogrammetriche-NDVI esportate da Agisoft Metashape, sia delle corrispondenti nuvole LiDAR regionali, non è stato necessario alcun ulteriore allineamento: la georeferenziazione diretta nRTK e la presenza di CP hanno garantito uno scarto planimetrico centimetrico tra i *dataset*. A titolo precauzionale sono comunque state estratte alcune *cross-section*; la sovrapposizione dei profili ha confermato la coerenza spaziale dei prodotti.

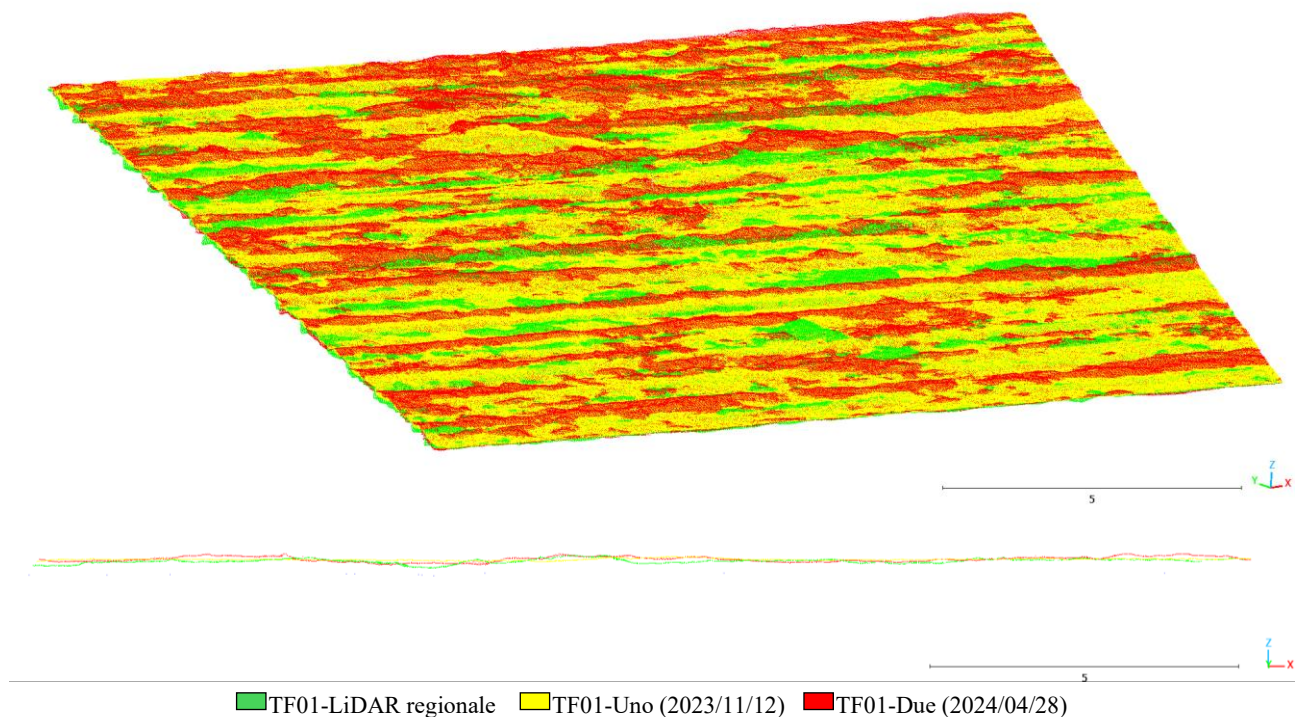


Fig. 13. TF01, verifica dell'allineamento tra le nuvole di punti

La prima operazione ha previsto la suddivisione delle nuvole in 3 macroclassi in modo tale da isolare le sponde: suolo nudo, vegetazione erbacea, vegetazione arborea.

Le nuvole LiDAR fornite dal geo-portale FVG sono già etichettate secondo la specifica ASPRS (*The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*) LAS 1.4 (classi 1 = *Overground*, 2 = *Ground*, 3 = *Low veget.*, 4 = *Medium veget.*, 5 = *High veget.*) [69]. In CloudCompare è stato quindi sufficiente filtrare i punti per *ClassID* e isolare:

- Suolo nudo → class 2 (*Ground*);
- Vegetazione erbacea/bassa → class 3 (*Low Vegetation*, 0,5-2 m);
- Vegetazione arborea → class 4 + 5 (*Medium + High Vegetation*, > 2 m).

Diversamente, le nuvole fotogrammetriche derivate da Metashape contenevano soltanto l'attributo colore in scala di grigi; il campo scalare *Index Value* esportato dal software non viene riconosciuto da CloudCompare. Per poter sfruttare l'informazione spettrale occorre dunque ricostruire il campo scalare NDVI e ricondurlo all'intervallo -1-1. Si è adottata la procedura seguente:

- 1) *Edit* → *Colors* → *Convert to Scalar Field*
 $Composite = (R + G + B)/3$
- 2) *Edit* → *Scalar Field* → *Arithmetic*
 $NDVI\ norm = Composite / 127,5$

Il primo passaggio converte la scala di grigi (0–255) in un campo scalare; il secondo la normalizza tra -1 e 1.

Sulla base della letteratura, che colloca suolo nudo e substrati minerali $< 0,2$, vegetazione rada $0,2–0,5$ e coperture forestali o chiome dense $> 0,5$ [70][71][72], si sono fissati i seguenti intervalli (Tab. 4):

Classe	Range NDVI normalizzato
Suolo nudo / ghiaia / sabbia	0,002 – 0,20
Vegetazione erbacea / arbustiva rada	0,201 – 0,50
Vegetazione arborea densa	0,501 – 1,00

Tab. 4. Intervalli NDVI adottati

Queste soglie sono state applicate al campo scalare NDVI normalizzato per segmentare automaticamente le nuvole nelle tre classi. Il risultato è visualizzato in (Fig. 14), dove il suolo nudo appare in scala grigia, la vegetazione erbacea in arancione e la vegetazione arborea in verde scuro.

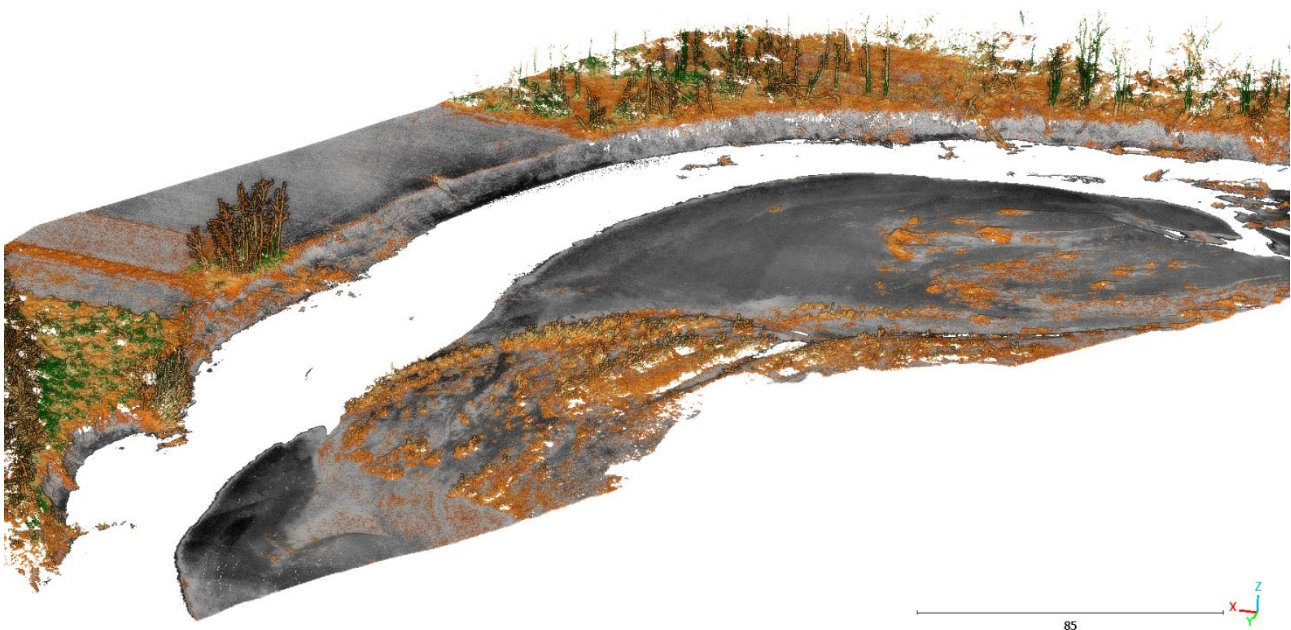


Fig. 14. Classificazione della nuvola in base alle soglie NDVI

Una volta isolata la classe “suolo nudo” per ciascuna nuvola, si è proceduto a una segmentazione manuale delle sole porzioni di sponda oggetto di arretramento.

L’operazione è stata svolta attraverso lo strumento

- *Segment* → *Polygonal Selection*

tracciando polilinee chiuse; le parti interne all’alveo sono state escluse per non contaminare l’analisi.

All’interno delle nuvole estratte possono persistere *outlier* (punti isolati o rumore fotogrammetrico) che, se non filtrati, alterano le statistiche di distanza. Si è quindi applicato il filtro *Statistical Outlier Removal* (SOR) con i parametri:

- $k = 24$;

- $\sigma = 2,0$.

valori consigliati per nuvole di punti ricavate da elaborazioni fotogrammetriche [73]. In particolare, k indica il numero di punti considerati nel vicinato di ciascun punto, mentre σ rappresenta la soglia (espressa come multiplo della deviazione standard) utilizzata per individuare i punti anomali (*outlier*). Tali parametri non hanno un'unità di misura assoluta, in quanto operano su distanze relative all'interno della nuvola di punti.

Per assicurare che i confronti multi-temporali non fossero influenzati da differenze planimetriche o nel regime idrometrico (quota del pelo libero al momento dei voli), ogni coppia di nuvole è stata ritagliata entro lo stesso *bounding box* 3D attraverso le seguenti procedure:

- 1) definizione del box mediante analisi visiva planimetrica e tramite l'individuazione della nuvola con quota minima maggiore

- *Edit* $\rightarrow$ *Crop*;

- 2) applicazione del box alle diverse epoche;
- 3) verifica con sezioni di controllo sulle parti piane o ritenute immutate.

Questa operazione evita che la presenza di acqua a quote diverse tra i voli introduca falsi volumi negativi/positivi nel calcolo delle distanze, pratica raccomandata in recenti linee guida per il *change-detection* fluviale [33].

Le diverse epoche sono state quindi confrontate con il *tool* C2C *Distance*, adottando i parametri che la letteratura indica come più adatti ai casi di grandi traslazioni planimetriche [74][74]:

- *Local model* = *None* — scelta preferibile quando la geometria di partenza e quella di arrivo sono molto dissimili, perché evita di forzare l'interpolazione di una superficie locale potenzialmente assente nella nuvola successiva;
- *Max. distance* = libera (calcolata automaticamente da CloudCompare in base all'analisi preliminare di densità), così da non troncare distanze reali anche dell'ordine di decine di metri;
- *Split X, Y and Z components* + *Merge X and Y (compute distance in the XY-plane)*, impostazione raccomandata quando interessa misurare lo spostamento laterale indipendentemente dalla componente verticale [76].

L'algoritmo ha restituito una nuova nuvola di punti con Scalar Field C2C in cui ogni punto è attribuito di:

- 1) Dist. 3D (valore assoluto euclideo);
- 2) Dist. XY (ipotenusa $\sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)}$ che quantifica l'arretramento planimetrico),
- 3) ΔX , ΔY , ΔZ separati.

I valori massimi coincidono con i tratti di sponda dove le ortofoto mostrano il crollo di intere nicchie di erosione, documentato anche da sopralluoghi di campo a valle del rilievo di febbraio 2025 (Fig. 15).

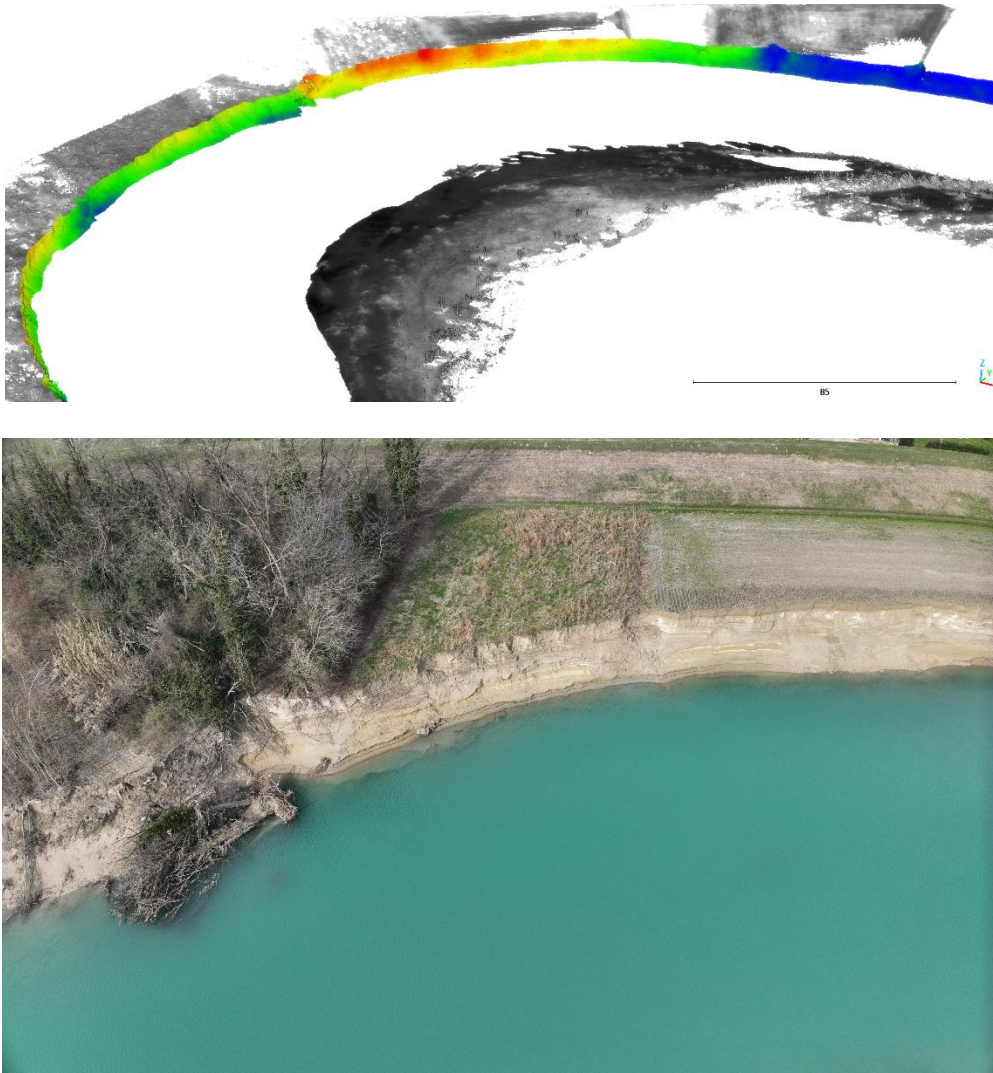


Fig. 15. Nuvola di punti in *Scalar Field C2C* su area di erosione TF07_2024-2025/Fotografia DJI-M3M della stessa area

La resa cartografica è stata impostata su una scala *diverging* “Red–Yellow–Blue” saturata a valori variabili in base all’entità dell’erosione per enfatizzare i gradienti più intensi; le zone in rosso indicano arretramenti, quelle in giallo-verde variazioni intermedie, mentre il blu identifica aree rimaste stabili. In Fig. 16 si osserva come la sponda concava di TF05 presenti un fronte di erosione nell’epoca 2024-2025, confermando il ruolo della dinamica di meandro.

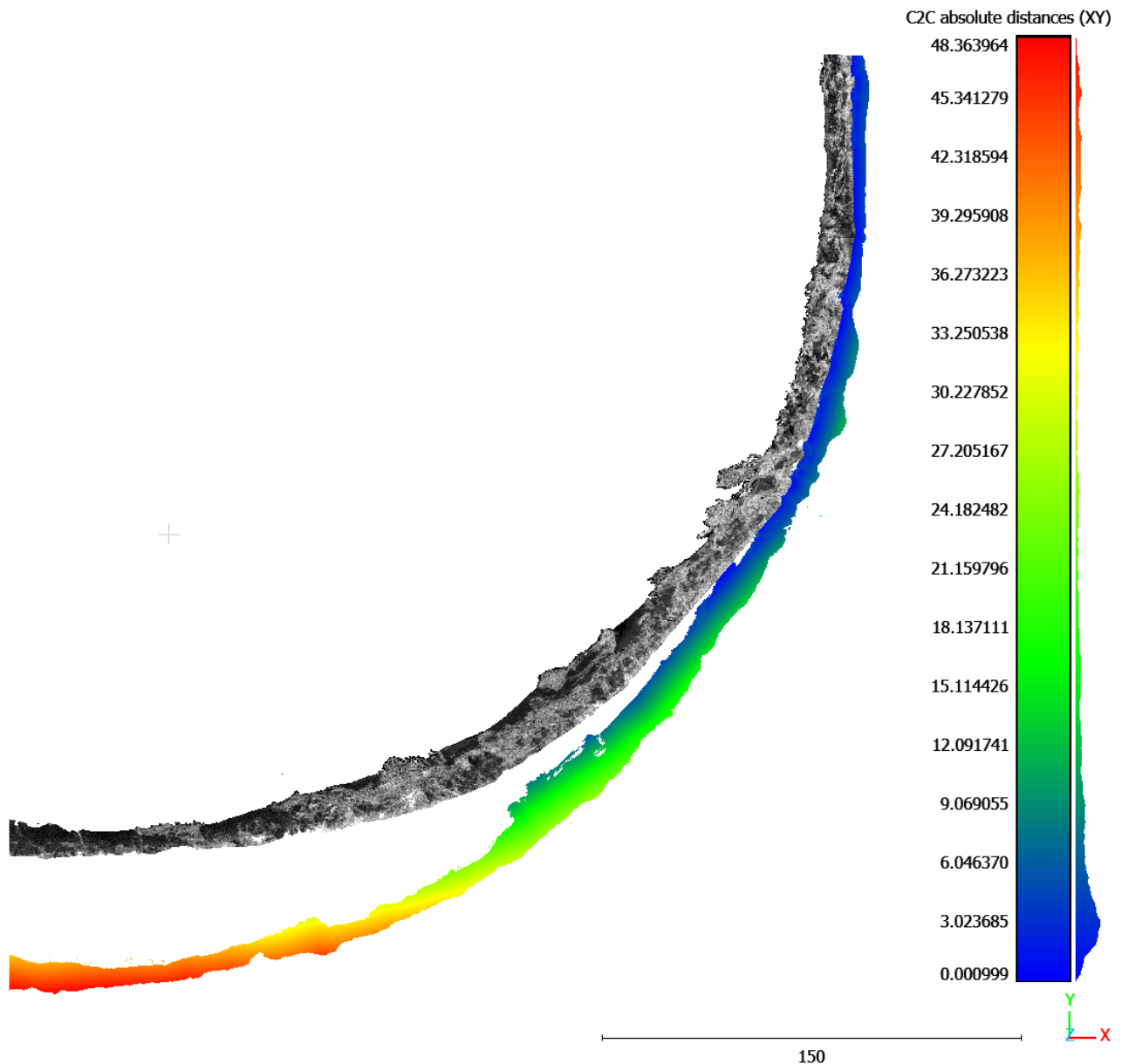


Fig. 16. Sponda in arretramento sul TF05 tra il 2024 e il 2025

Questo *workflow*, già sperimentato con successo in contesti analoghi di *bank erosion* [74][77], si è dimostrato robusto e computazionalmente efficiente anche in presenza di spostamenti estremi.

Per confermare ulteriormente le distanze individuate e avere una rappresentazione visuale e quantitativa più immediata delle variazioni morfologiche, si è adottata la tecnica del *slicing* 3D. Questa metodologia prevede la generazione di sezioni trasversali verticali e orizzontali nelle aree di massimo arretramento erosivo (Fig. 17). Utilizzando lo strumento *Cross Section* di CloudCompare, sono state estratte sezioni orizzontali (parallele all'alveo) ogni 75 cm e 3 verticali (trasversali rispetto all'asse principale del fiume) in corrispondenza delle zone dove la distanza C2C aveva mostrato variazioni notevoli.

Queste sezioni, con spessore di 4 cm per garantire una rappresentatività statistica dei punti, sono state confrontate direttamente tra le epoche precedenti e successive. Dalla sovrapposizione grafica delle sezioni è stato possibile misurare in maniera precisa lo spostamento laterale delle sponde, verificando visivamente e quantitativamente gli arretramenti registrati precedentemente nel C2C.

Questa procedura ha consentito di ottenere stime accurate e realistiche della reale entità delle erosioni laterali delle sponde, nonché di documentare in maniera chiara i cambiamenti geomorfologici verticali delle sponde (crolli di parete, scivolamenti localizzati, ecc.).

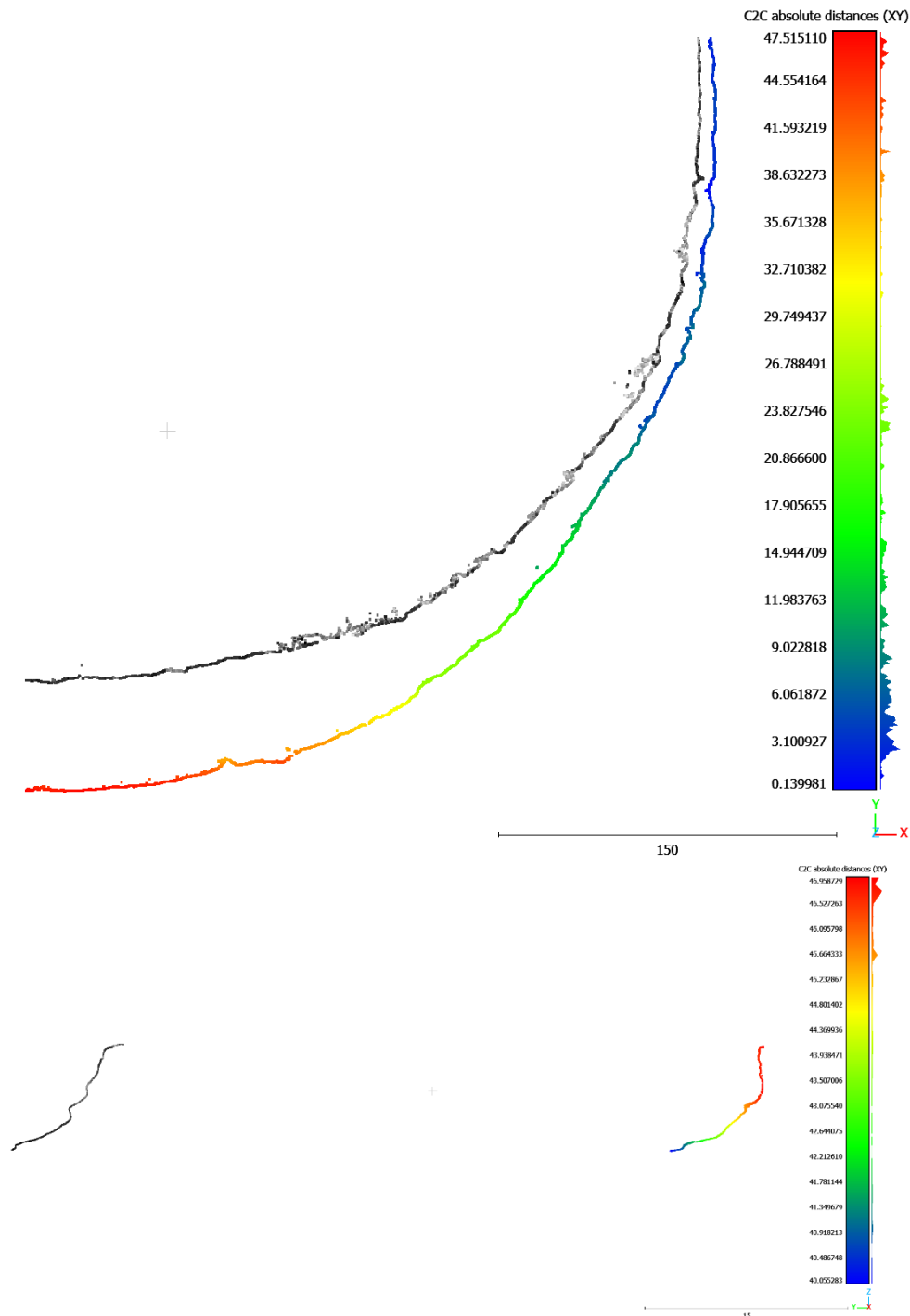


Fig. 17. Slices delle nuvole di punti del TF05 tra il 2024 e il 2025

L'approccio C2C integrato con *slicing* è stato quindi preferito al metodo M3C2 per ragioni legate alla geometria estremamente variabile delle sponde e all'entità degli arretramenti riscontrati. L'utilizzo del C2C, seppur più semplice, è risultato particolarmente efficace e robusto nel contesto specifico del Tagliamento, permettendo di gestire l'enorme disparità geometrica tra le epoche analizzate. L'integrazione con sezioni verticali ha inoltre permesso di superare le criticità tipiche del C2C legate alla componente verticale e alla variabilità locale, offrendo al contempo una verifica visiva e numerica puntuale dei risultati.

Questa combinazione metodologica ha consentito di ottenere risultati scientificamente solidi, affidabili e ripetibili, evidenziando chiaramente le dinamiche erosive in corso e fornendo dati quantitativi fondamentali per successive analisi geomorfologiche e gestionali delle sponde fluviali.

Terminata la verifica planimetrica con C2C e la validazione puntuale mediante *slicing* 3D, si è proceduto alla quantificazione volumetrica del materiale mobilitato lungo le sponde mediante il tool integrato di CloudCompare *Tools* → *Volume* → *Compute 2.5D Volume*. Questo comando implementa un *differencing raster-based* concettualmente analogo al classico DoD [32][33], ma operando direttamente sulle nuvole di punti anziché su DEM pre-interpolati, riducendo gli errori di campionamento [79].

Per ciascun test field è stato creato un piano orizzontale “fittizio” che svolgesse il compito di “*Ground*” tra la sponda originale e la sponda erosa; è stata definita la nuvola all’epoca successiva come “*Ceil/After*” e la nuvola all’epoca precedente come “*Ground/Before*” (così da ottenere volumi negativi = erosione).

Per quanto riguarda i parametri del grigliato sono stati impostati i seguenti valori:

- *grid step*: 0,04 m, pari al doppio del GSD fotogrammetrico, così da considerare la carenza di punti dovuta alla classificazione ed evitare sotto-campionamento eccessivo;
- *projection dimension*: Z (elevazione);
- *projection type* = *Average height*; in questo modo eventuali punti residuali di vegetazione non filtrati vengono mediati in cella, riducendo il rischio di *outlier* altimetrici [74].

Il *tool* calcola per ogni cella del grigliato:

- $\Delta Z = Z_{\text{post}} - Z_{\text{pre}}$ (m);
- *Cut volume* (erosione) = $\sum(dZ < 0) \times A$;
- *Fill volume* (deposizione) = $\sum(dZ > 0) \times A$,
- dove $A = 0,04 \text{ m} \times 0,04 \text{ m} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

L’accuratezza del volume è stata valutata con un’approssimazione LoD95 [33]:

$$LoD_{95} = \pm 1,96 \sqrt{\sigma_{pre}^2 + \sigma_{post}^2 + reg_1^2 + reg_2^2} \quad (3)$$

dove:

- σ corrisponde al rumore di ogni nuvola, calcolato su ogni nuvola attraverso il tool *Tools* → *Other* → *Compute geometric features* → *Roughness*;
- *reg* corrisponde alla precisione ottenuta nell’orientamento assoluto.

Gli esiti delle analisi saranno discussi al capitolo successivo.

Relativamente alla visualizzazione, il tool genera una Nuvola di punti con *Scalar Field* “*Relative Height*”: ciò permette di mappare le zone di volume eroso (blu) e deposto (rosso) con una scala *diverging-standard* (Fig. 18). La morfologia erosiva appare come una fascia blu continua lungo il piede spondale, in linea con modelli di meandro migrante [80].

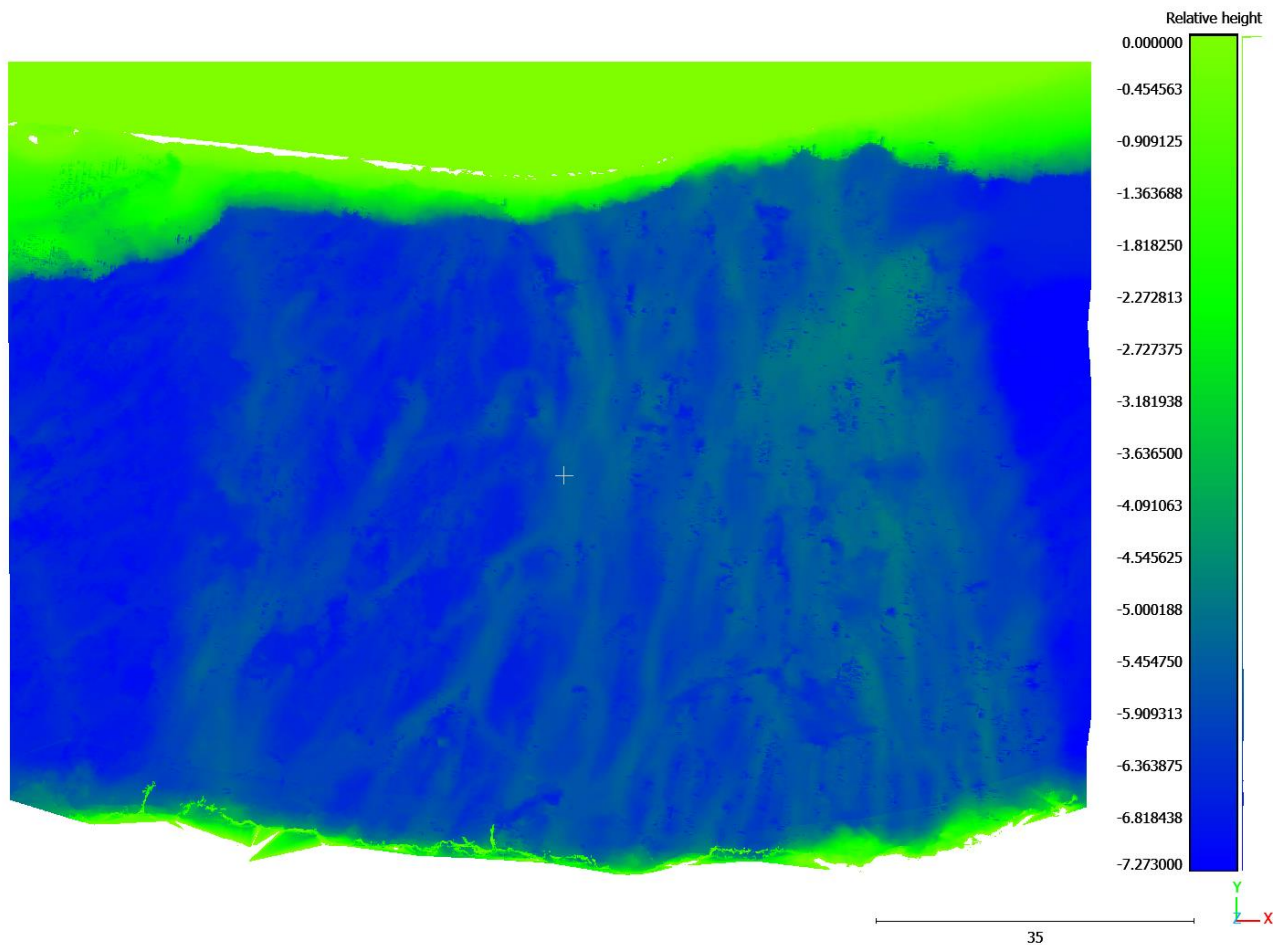


Fig. 18. Visualizzazione del volume eroso in una porzione limitata del T04 tra il 2017-2020 e il 2023

L'impiego del *tool Compute 2.5D Volume* ha consentito di tradurre le variazioni di forma, individuate via C2C e validate con *slicing*, in un bilancio quantitativo di sedimento eroso, requisito fondamentale per la valutazione della variabilità morfosedimentaria del Tagliamento [81]. Integrato con le analisi planimetriche, il dato volumetrico offre una base oggettiva per stimare i tassi di erosione annui e per calibrare eventuali modelli idraulico-morfodinamici futuri.

4.5. Analisi semplificata dei Modelli Digitali di Elevazione (DEM) e delle ortofoto

Per valutare in modo rapido le zone in cui la piena ha asportato copertura vegetale o rimodellato micro-rilievi, è stato eseguito un confronto diretto fra DSM di epoche diverse tramite la procedura guidata *Change Detection Wizard* di ArcGIS Pro.

L'obiettivo era puramente visivo-interpretativo: individuare aree di scomparsa di vegetazione (erosione di boschetti, cedimento di ceppaie, scalzamento di prato ripariale) affiancando la mappa di differenza all'ortofoto corrispondente. Non è stato quindi applicato alcun calcolo di soglia LoD o di bilancio volumetrico come fatto precedentemente.

Il workflow adottato ha previsto la preparazione dei raster

- DSM_regionale (pixel 0,50 m; acquisizione 2017–2020);
- DSM_UAV_epoca01 (pixel 0,02 m; voli 2023–2025).

Per permettere il confronto, il DSM_UAV_epoca01 è stato ricampionato

- *resample* → *Bilinear* a 0,05 m (*Reduce Raster Size*)

così da non esagerare lo scarto di risoluzione, ma mantenere un dettaglio utile [7].

I parametri impostati nello strumento *Change Detection Wizard* sono i seguenti:

- *Method* = *Pixel Value Change*;
- *From raster* = DSM_regionale;
- *To raster* = DSM UAV;
- *Processing extent* = *Intersection* (garantisce area comune).

Il *wizard* ha prodotto un *Difference Raster* ($\Delta Z = \text{DSM_UAV_epoca01} - \text{DSM_reg}$) classificato automaticamente in tre classi: decremento, incremento, nessun cambiamento (Fig. 19).

Attraverso la *Change Detection View* di ArcGIS Pro (*split-screen*) il raster ΔZ è stato affiancato all'ortofoto ad alta risoluzione (Fig. 20): zone rosse ($\Delta Z < 0$) indicano abbassamento: rimozione di chiome/ceppaie o scalzamento di suolo; zone verdi ($\Delta Z > 0$) indicano innalzamento: risedimentazione o crescita arborea.

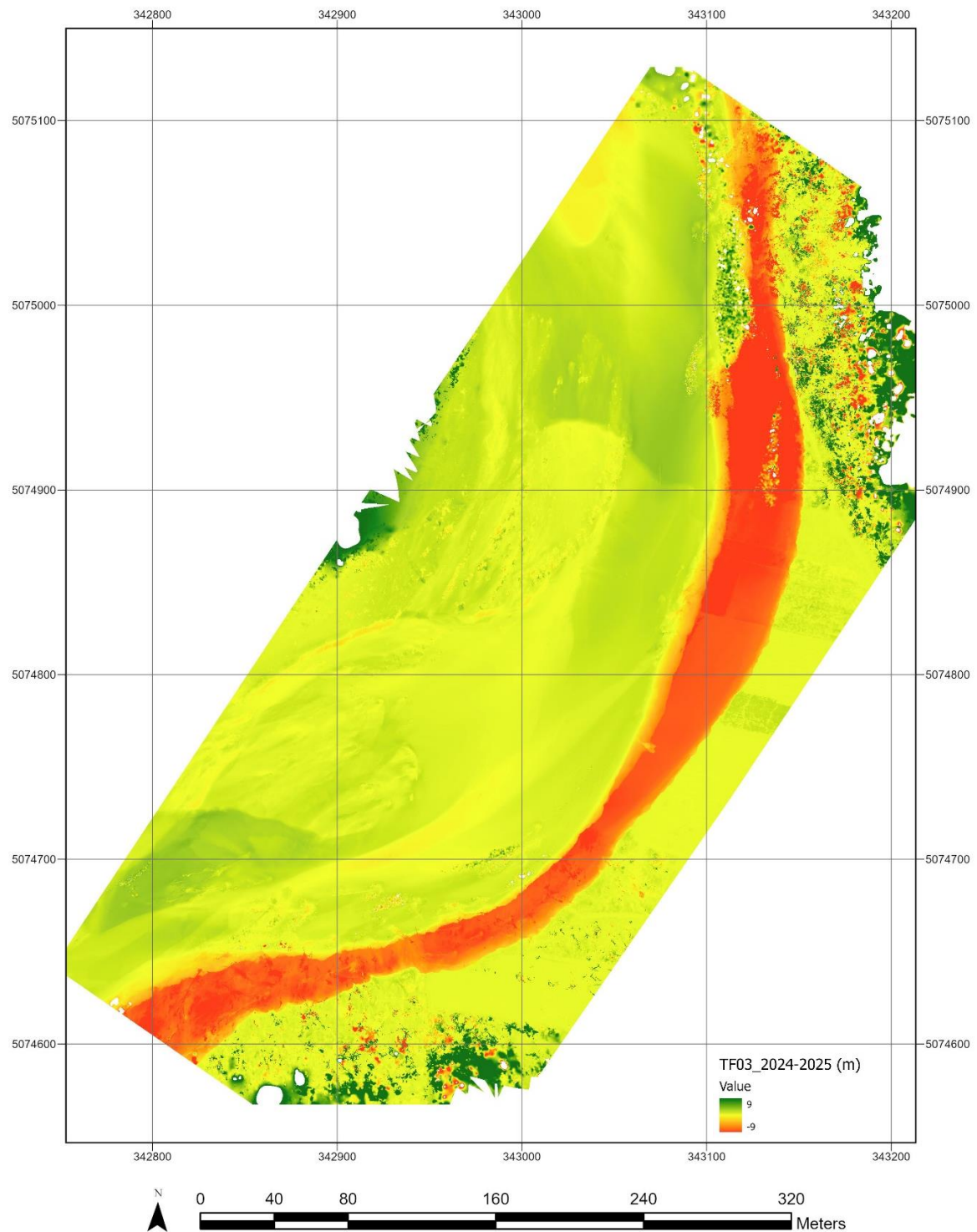


Fig. 19. Differenza tra DSM riferite al TF03 2024-2025

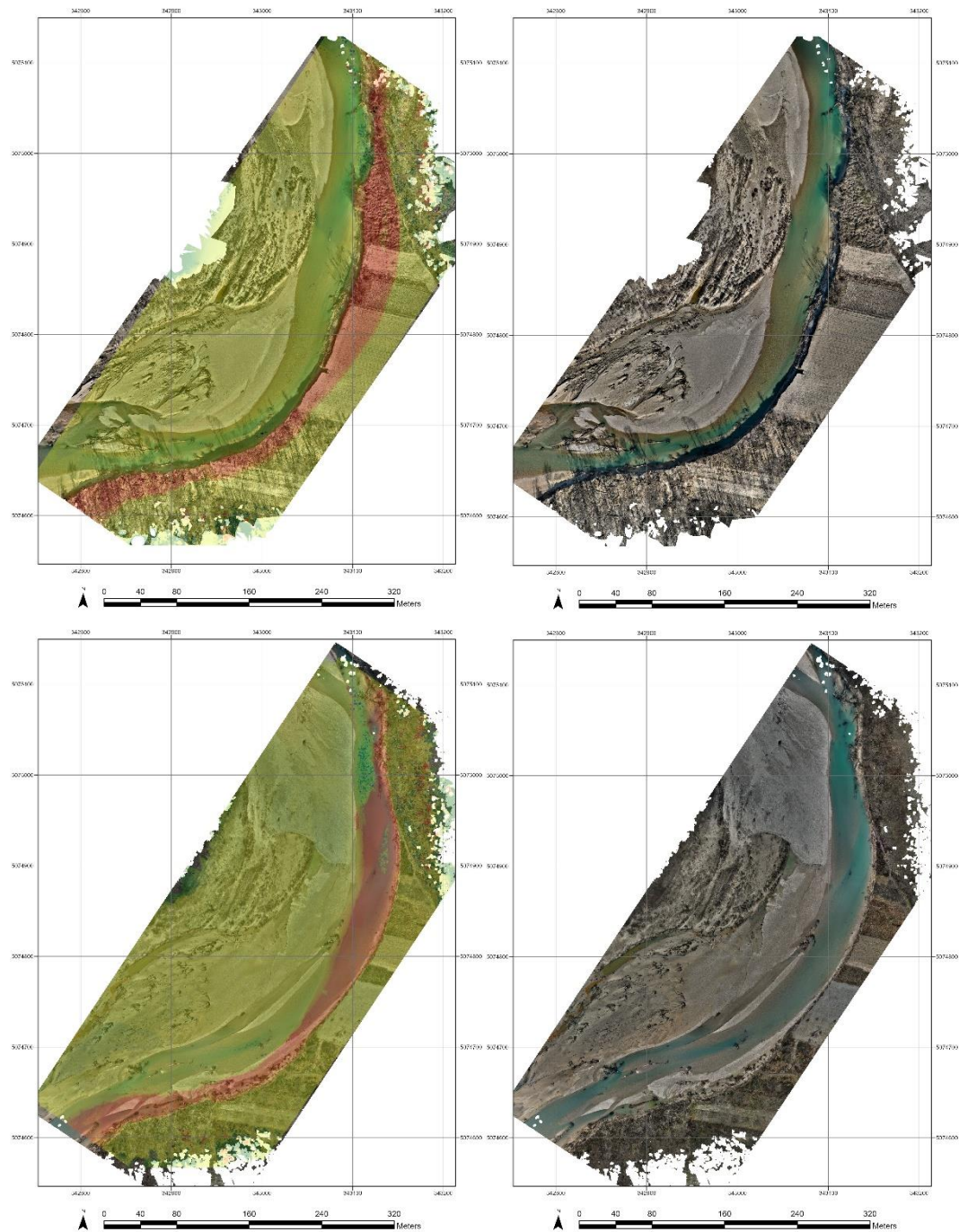


Fig. 20. Confronto tra DSM e ortofoto 2024-2025

Questo approccio rapido e semplificato è adatto a una ricognizione esplorativa post-evento e l'affiancamento con l'ortofoto consente di interpretare subito se il ΔZ è attribuibile a vegetazione asportata o a variazioni di terreno nudo.

Non essendo stato impostato un LoD, i valori minimi devono essere letti con cautela: eventuale rumore fotogrammetrico o differenze di quota idrometrica possono generare falsi cambiamenti [32].

Oltretutto il *resampling* introduce una lieve sfocatura del DSM fotogrammetrico, sufficiente però per scopi qualitativi [7].

Con questo metodo snello è stato dunque possibile mappare rapidamente i tratti di erosione vegetazionale, che nei capitoli precedenti vengono correlati alle distanze C2C e alle fotografie di campo per delineare un quadro completo degli effetti della piena sul corridoio ripariale.

Per cogliere in modo immediato lo spostamento laterale del Tagliamento ci si è limitati a un confronto puramente planimetrico fra ortofoto di epoche diverse. Sono state utilizzate le ortofoto

regionali del 2017-2020, con risoluzione di 0,10 m, e quelle a 0,02 m generate dai voli UAV tra il 2023 e il 2025. Poiché entrambi i dataset sono già georeferenziati nel sistema di riferimento RDN2008 / UTM 33 N, la loro sovrapposizione in ArcGIS Pro non ha richiesto ulteriori correzioni.

La procedura è stata lineare. In una prima sessione di *editing* si è visualizzata l'ortofoto regionale e, con il comando di digitalizzazione standard, è stata tracciata una polilinea continua lungo il limite visibile fra acqua e sedimento emerso: questa è diventata la *waterline* di riferimento per il periodo 2017-2020. È stata quindi sostituita in mappa lo sfondo con l'ortofoto UAV più recente, lasciando attivo lo stesso *layer* di *editing*, ed è stata digitalizzata una seconda polilinea lungo il nuovo margine d'acqua. Per ridurre l'influenza di eventuali differenze di portata tra le due date, sono stati digitalizzati soltanto i tratti di sponda.

Una volta ottenute le due linee, la sovrapposizione ha permesso un confronto visuale diretto. Dove le polilinee coincidono la riva è rimasta stabile; laddove la linea più recente si colloca all'interno rispetto a quella del 2020 è avvenuto un arretramento per erosione, mentre la situazione contraria indica deposizione laterale. Nei vari test field è stata misurata con lo strumento «*Measure*» le distanze massime fra le due tracce. Questi valori, pur ottenuti con un metodo cartografico elementare, risultano coerenti con le distanze orizzontali derivate dall'analisi Cloud-to-Cloud descritta nei paragrafi precedenti, confermando la bontà dell'osservazione diretta sulle ortofoto.

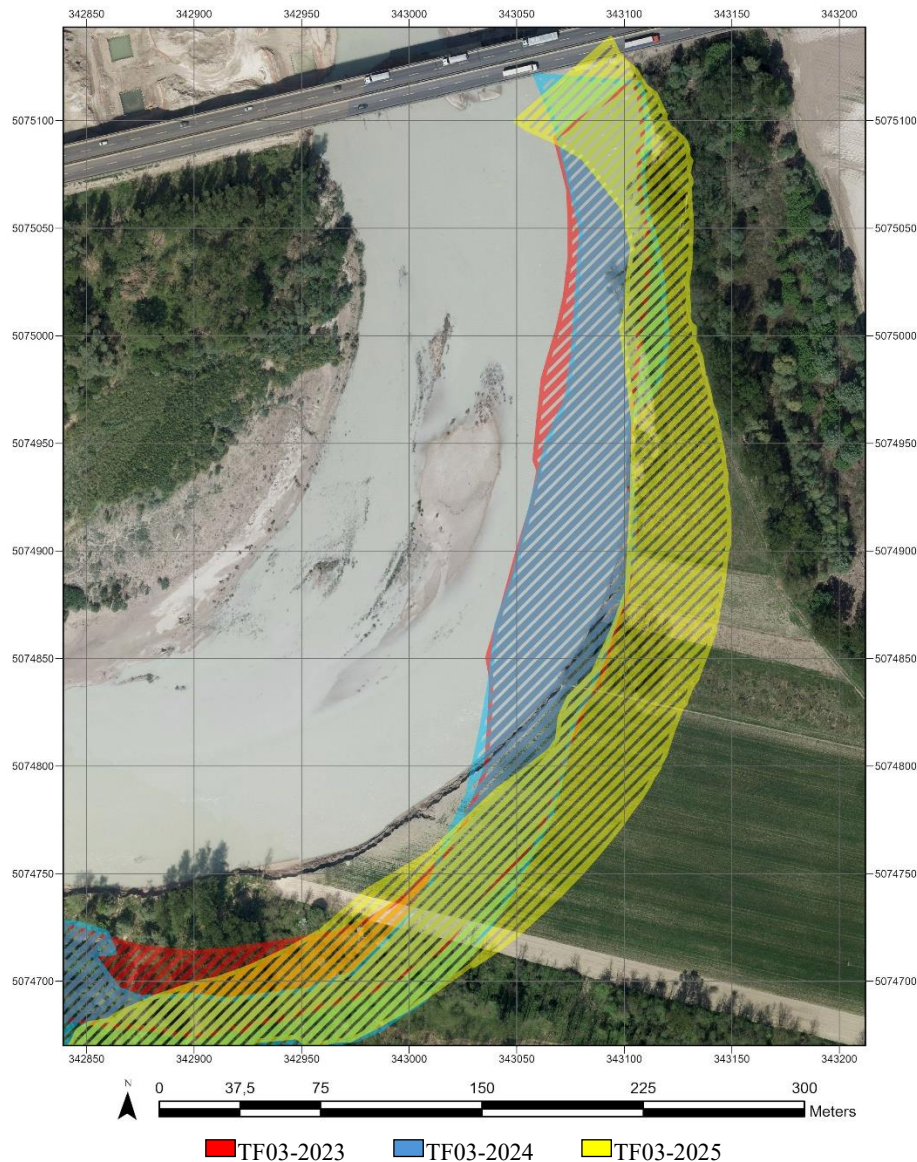


Fig. 21. TF03: confronti tra le ortofoto regionale 2017-2020 e le *breaklines* 2023, 2024, 2025 digitalizzate

Il principale vantaggio di questa procedura risiede nella rapidità e nel fatto che produce un risultato immediatamente leggibile anche da chi non ha familiarità con le analisi 3D e si integra senza problemi con altri layer GIS. Il limite evidente è l'assenza di informazioni altimetriche o volumetriche; inoltre, se le ortofoto provengono da acquisizioni con livelli idrometrici molto diversi, la linea d'acqua rischia di riflettere più la variazione di portata che l'effettivo arretramento spondale.

La digitalizzazione delle *waterline* sulle ortofoto ha fornito dunque una mappa qualitativa dei cambiamenti planimetrici, utile per indirizzare le analisi tridimensionali più onerose e per comunicare in modo chiaro l'entità degli spostamenti laterali ai soggetti interessati alla gestione del corridoio fluviale.

4.6. Analisi spettrale su ortofoto NDVI e NDWI

Le ortofoto NDVI e NDWI esportate direttamente da Metashape, con risoluzione di 0,02 m, sono state caricate in ArcGIS Pro per valutare i cambiamenti di copertura all'interno dei tre sub-tratti TF03, TF05 e TF07, considerati di maggiore interesse ai fini della ricerca rispetto agli altri. L'obiettivo era quantificare, per ciascuna epoca, la superficie occupata da differenti categorie di vegetazione e di suolo nudo, escludendo a monte le aree agricole che avrebbero falsato l'analisi.

Per evitare che la rotazione colturale alterasse l'interpretazione degli indici, l'ortofoto è stata mascherata con un poligono derivato dalla Carta dell'Uso del Suolo regionale. Le zone classificate come "Seminativi" o "Prato stabile" sono state convertite in un raster binario, quindi sottratte ai rasters NDVI e NDWI mediante il tool *Clip raster*. In questo modo l'elaborazione successiva si è concentrata esclusivamente sul corridoio fluviale e sulle zone vegetate.

L'intervallo completo degli indici (Tab. 5), già normalizzato in Metashape fra -1 e 1, è stato suddiviso in classi di ampiezza non uniforme, tarate sui valori soglia proposti in letteratura per ambienti ripariali nord-alpini [82][83]. Il gradiente va dal rosso (acqua) al verde (bosco maturo).

Classe	Range NDVI	Interpretazione	Colore
1	-1,00 – 0,015	acqua / ombra	rosso
2	0,016 – 0,15	ghiaia asciutta	arancio scuro
3	0,141 – 0,18	ghiaia umida / alghe	arancio chiaro
4	0,181 – 0,27	vegetazione pioniera	giallo
5	0,271 – 0,36	prato ripariale	verde chiaro
6	0,361 – 0,77	arbusti / saliceti	verde
7	0,741 – 1,00	bosco maturo	verde scuro

Tab. 5. Intervalli NDVI

Per l'NDWI, più sensibile al gradiente umido–secco, è stata adottata una palette che va dal bianco al blu in cinque classi (Tab. 6) [84][85]:

Classe	Range NDWI	Descrizione idrologica	Colore
A	-1,00 – 0,00	suolo secco / ghiaia	bianco
B	0,001 – 0,30	suolo umido	azzurro chiaro
C	0,301 – 0,50	saturatione / pozze	azzurro
D	0,501 – 0,70	acqua bassa	blu
E	0,701 – 1,00	acqua profonda	blu scuro

Tab. 6. Intervalli NDWI

Attraverso lo strumento *Reclassify (Spatial Analyst)*, i valori continui sono stati sottoposti a discretizzazione negli intervalli prestabiliti, restituendo un raster categoriale interpretabile in ambiente GIS (Fig. 22). È stata quindi attivata l'opzione *Build Raster Attribute Table*: ArcGIS Pro ha assegnato automaticamente a ciascuna classe il numero di pixel e l'estensione in metri quadrati ($\text{Area} = \text{Numero Pixel} \times 0,0004 \text{ m}^2$).

Per ciascun test-field la tabella attributi del raster riclassificato fornisce, in uscita, la superficie occupata da ogni classe.

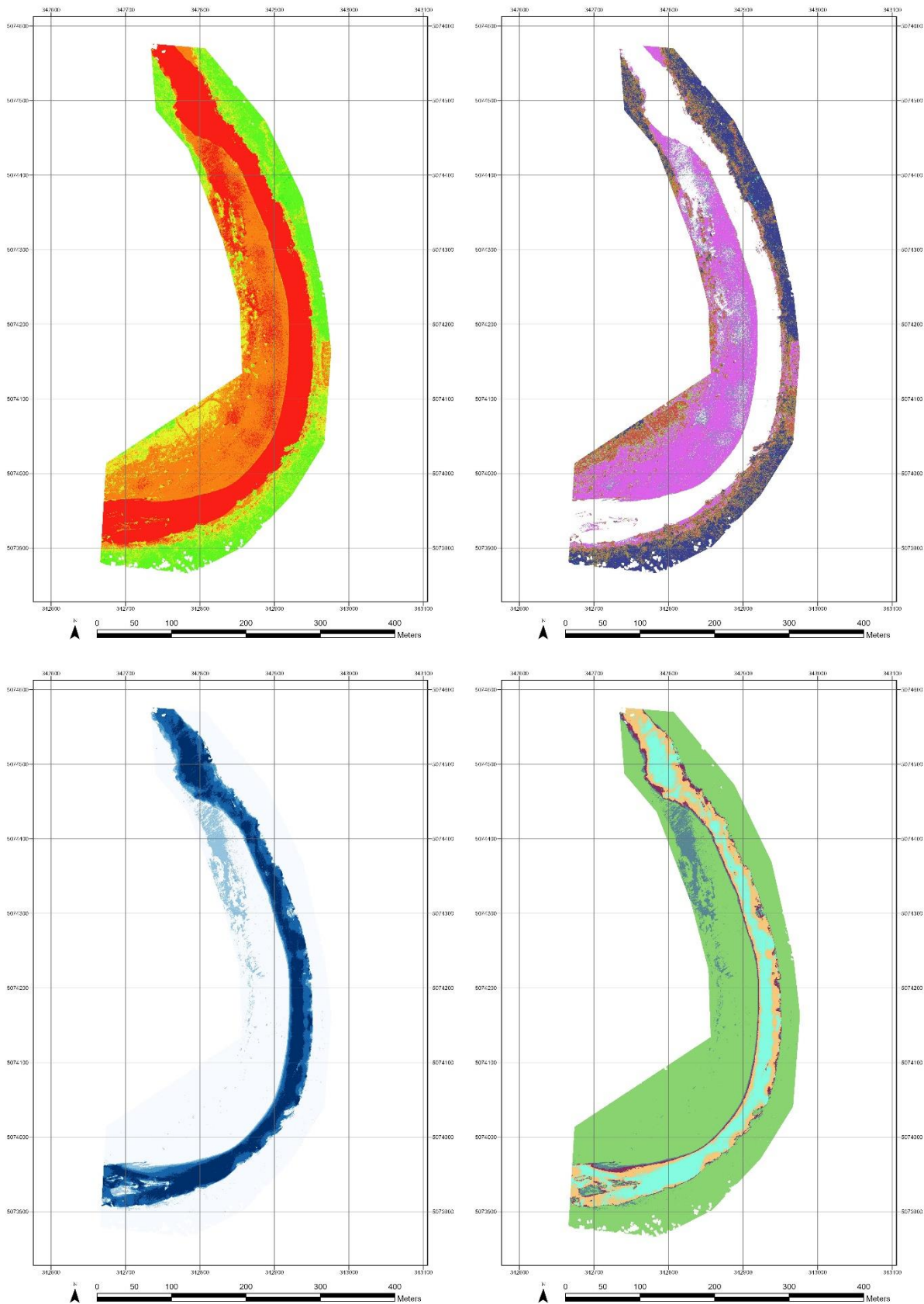


Fig. 22. TF03-Due: ortofoto NDVI/NDWI ritagliata, ricodificazione

Il vantaggio principale di questo approccio risiede nel rapporto fra rapidità e livello di dettaglio: l'intera catena (mascheratura, riclassificazione, calcolo aree) richiede meno un tempo relativamente limitato per sub-tratto su una *workstation* di media potenza, ma restituisce una misura oggettiva

dell'evoluzione dello stato vegetativo. Il limite, comune a ogni classificazione per soglie fisse, consiste nella sensibilità alle condizioni fenologiche: immagini acquisite in stagioni diverse potrebbero spostare leggermente il confine fra classi.

Nel complesso, la semplice riclassificazione delle ortofoto NDVI/NDWI ha permesso di quantificare in metri quadrati la quantità di vegetazione ripariale in una specifica data, quella del rilievo, fornendo un complemento essenziale alle analisi morfometriche tridimensionali illustrate nei paragrafi precedenti.

4.7. Analisi multispettrale con Sentinel-2: integrazione sinottica alle ortofoto UAV

L'integrazione fra dati ad alta risoluzione (M3M, GSD = 2 cm) e dati satellitari sinottici (Sentinel-2, GSD = 10 m) consente di collocare i risultati di dettaglio entro un contesto spaziale e temporale più ampio. Il programma Copernicus fornisce gratuitamente le immagini Sentinel-2 MSI, le quali offrono tredici bande spettrali fra il visibile e l'infrarosso, con risoluzioni di 10 m (bande nel visibile e NIR), 20 m (*red-edge* e SWIR) e 60 m (bande atmosferiche) e un tempo di rivisita di cinque giorni a latitudini temperate [86][87]. Questa caratteristica rende il sensore particolarmente adatto a monitorare la dinamica della vegetazione ripariale e l'umidità superficiale su scale inter-stagionali e post-evento.

Per mantenere la coerenza fenologica con i rilievi fotogrammetrici da UAV, sono state individuate, tramite il filtro “*Cloud Cover < 10 %*” sul portale Copernicus Open Access Hub, le immagini Sentinel-2 Level-2A (BOA (*Bottom-Of-Atmosphere*)) relative alle stesse date. Le immagini sono state scaricate ed importate in ArcGIS Pro.

Durante l'importazione è stata applicata la riproiezione *on-the-fly* in RDN2008 / UTM 33 N per allineare i raster agli altri layer del progetto, quindi, tramite il *tool Raster Calculator*, sono stati calcolati:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} \quad (2)$$

dove B8 (842 nm) è la banda NIR, B4 (665 nm) la banda rossa e B3 (560 nm) la banda verde [85][88]. I raster risultanti sono stati salvati con pixel da 10 m.

Gli indici creati sono stati ritagliati (*Clip raster*) sulle geometrie poligonali dei test field. Come già fatto per le ortofoto UAV, è stato sottratto dal dominio di analisi il poligono delle superfici agricole, così da evitare che l'alternanza colturale falsasse le statistiche.

Per mantenere la coerenza interpretativa con il capitolo precedente, i raster NDVI Sentinel-2 sono stati riclassificati (*Reclassify*) nelle sette classi riportate in Tab. 5, mentre l'NDWI è stato ricodificato nelle cinque classi A–E riportate in Tab. 6. Il tool *Build Raster Attribute Table* ha restituito, per ciascun *test field* e per ogni epoca, il numero di pixel e la superficie (pixel × 100 m²) occupata da ogni classe e la variazione rispetto al periodo.

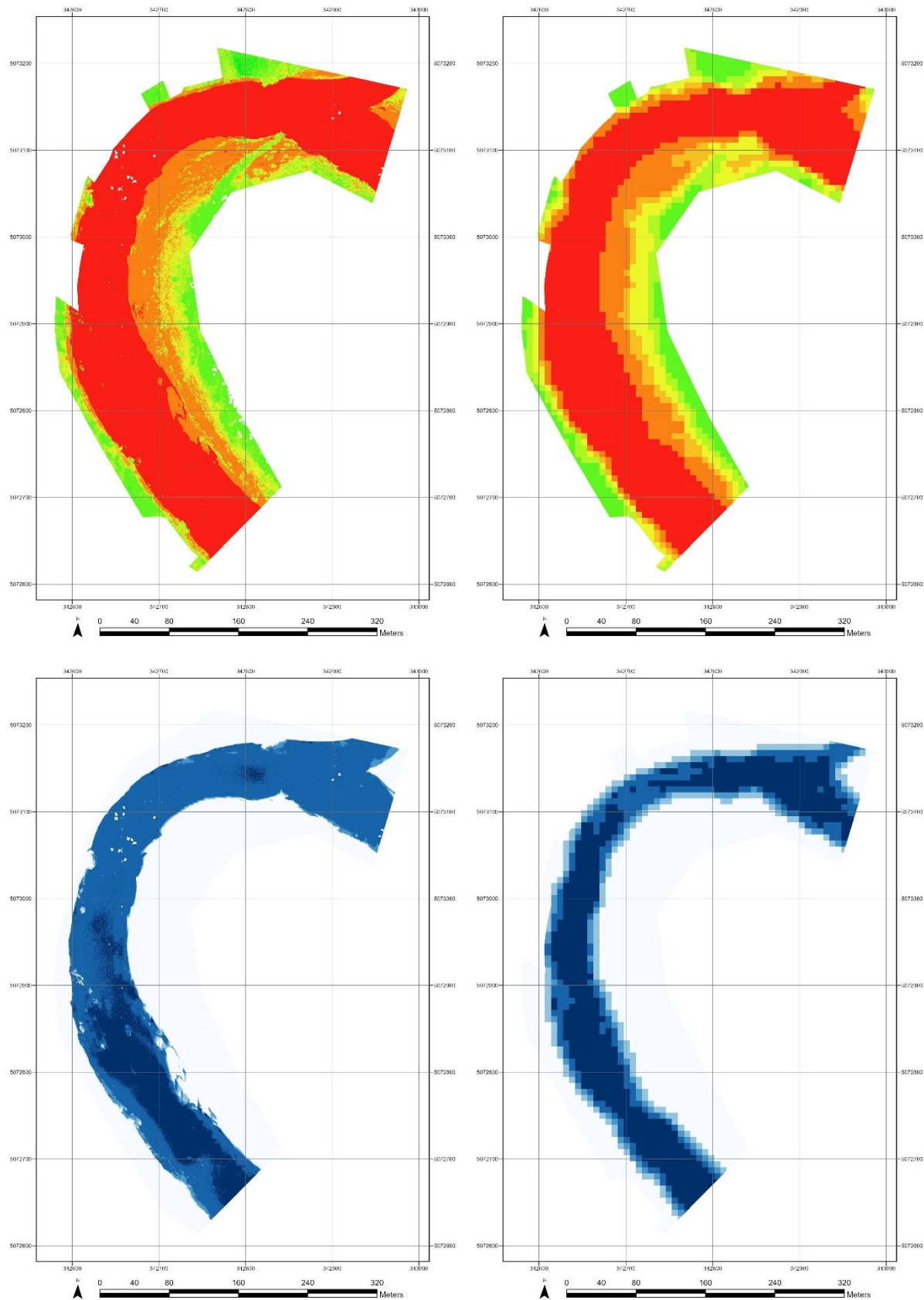


Fig. 23. TF07-Tre: indici NDVI e NDWI derivati dal DJI-M3M e da Sentinel-2

L'uso di Sentinel-2 aggiunge al quadro di dettaglio UAV due punti di forza: la copertura sinottica (l'intero corridoio fluviale in un'unica scena) e la rilevanza temporale (una nuova osservazione ogni cinque giorni), che permettono di cogliere episodi di vegetazione flottante tra un volo e l'altro. La

limitazione rimane la scala: a 10 m di pixel le piccole isole vegetate o i bracci secondari scompaiono, e i valori mediani vengono “smorzati” dal mescolamento spettrale di acqua, ghiaia e vegetazione all’interno dello stesso pixel [82].

Ciononostante, la convergenza fra *trend* UAV e *trend* Sentinel-2 conferma l’utilità di un approccio gerarchico: il drone per misurare l’evoluzione puntuale delle sponde e della vegetazione pioniera, il satellite per verificare se le dinamiche osservate localmente si estendono o meno a tutto il tratto medio-basso del Tagliamento.

4.8. Monitoraggio rapido degli effetti di nove piene (set 2023 – mar 2025) con dati idrometrici regionali e immagini Sentinel-2

Lo scopo di questo capitolo è indagare se i picchi di portata, anche modesti, registrati nel Tagliamento fra settembre 2023 e marzo 2025 si riflettano, entro una finestra di pochi giorni, sui principali indici spettrali rilevabili dal sensore Sentinel-2. Il flusso di lavoro integra dati idrometrici puntuali (tre stazioni della Protezione Civile FVG) con dati ottici multispettrali a 10 m di GSD, producendo una lettura sinottica degli eventuali stress della vegetazione e delle variazioni del contenuto d’acqua di suolo e sedimenti.

I livelli idrometrici giornalieri delle stazioni Latisana-1, Latisana-2 e Madrisio sono stati scaricati in formato CSV dal portale regionale, importati in Microsoft Excel e graficizzati diagrammi mensili livello-tempo (Fig. 24).

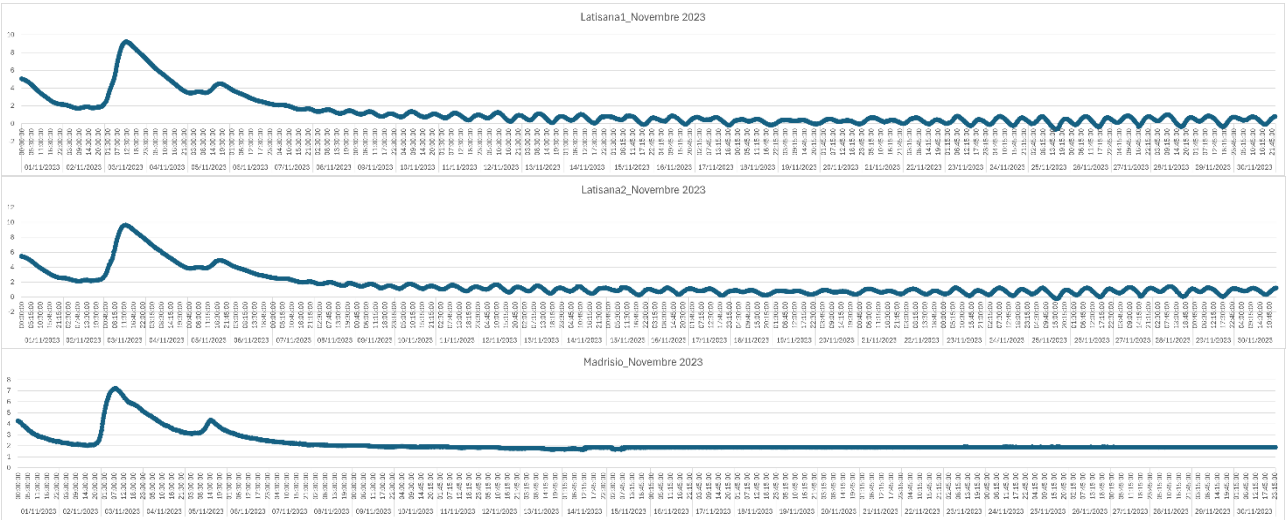


Fig. 24. Diagramma livello idrometrico-tempo delle 3 stazioni a novembre 2023

Sulle curve sono stati evidenziati ed individuati i nove picchi (Tab. 7) superiori alla soglia di guardia per le stazioni idrometriche di Latisana-1 e di Madrisio della Protezione Civile regionale [89]:

L1/M	LIVELLI		
	GUARDIA (5,40m) (2,00m)	1° PRESIDIO (7,20m) (4,60m)	2° PRESIDIO (8,70m) (5,40m)
31/10/2023-04/11/2023	L1/M	L1/M	L1/M
02/12/2023-03/12/2023	M		
23/02/2024-25/02/2024	M		
11/03/2024-12/03/2024	M		
01/04/2024-03/04/2024	L1/M	M	
16/05/2024-18/04/2024	M	M	
27/09/2024-29/09/2024	M		
09/10/2024-20/10/2024	L1/M	M	M
28/01/2025-29/01/2025	M		

Tab. 7. Tabella Idrometro-Evento_Latisana1/Madrisio

Benché solo le piene del 31/10/2023-04/11/2023 e 09/10/2024-20/10/2024 abbiano varcato la soglia di 2° presidio, i restanti sette episodi sono stati inclusi perché potenzialmente in grado di rimuovere vegetazione pioniera o rimobilitare il velo d’acqua superficiale [81].

Per ciascuna data di picco è stata interrogata la banca dati Copernicus Open Access Hub importando la macroarea di interesse in formato .kmz e filtrando i prodotti secondo i criteri:

- Cloud cover < 10 %;

- *Product: Level-2A BOA.*

Sono state scaricate la scena più vicina prima del picco ($t_0 - \leq 7$ giorni) e la prima dopo ($t_0 + \leq 7$ giorni) per minimizzare l'effetto fenologico. Quando la nuvolosità superava il 10 %, si è spostata la finestra temporale di ± 1 passaggio. Tutte le immagini sono state scaricate ed aggiunte in ArcGIS Pro.

Come al capitolo precedente, con *Raster Calculator* sono stati generati, per ogni scena l'indice NDVI ed NDWI, sono stati utilizzati gli stessi intervalli di classe e sono stati riclassificati così da poter ottenere il numero di pixel e la superficie per ciascuna classe

È stato quindi utilizzato lo strumento *Change Detection Wizard*, selezionando come input i raster degli indici NDVI e NDWI relativi alle due date considerate (pre e post-evento). Lo scopo era ottenere una rappresentazione chiara dei cambiamenti intervenuti, sia in termini di aumento che di riduzione dell'indice, sfruttando la modalità di analisi per valori continui. Il risultato ha permesso di visualizzare e quantificare in modo efficace le variazioni spaziali tra le due epoche, evidenziando le aree soggette a modifiche significative nella vegetazione o nella presenza di acqua (Fig. 25).

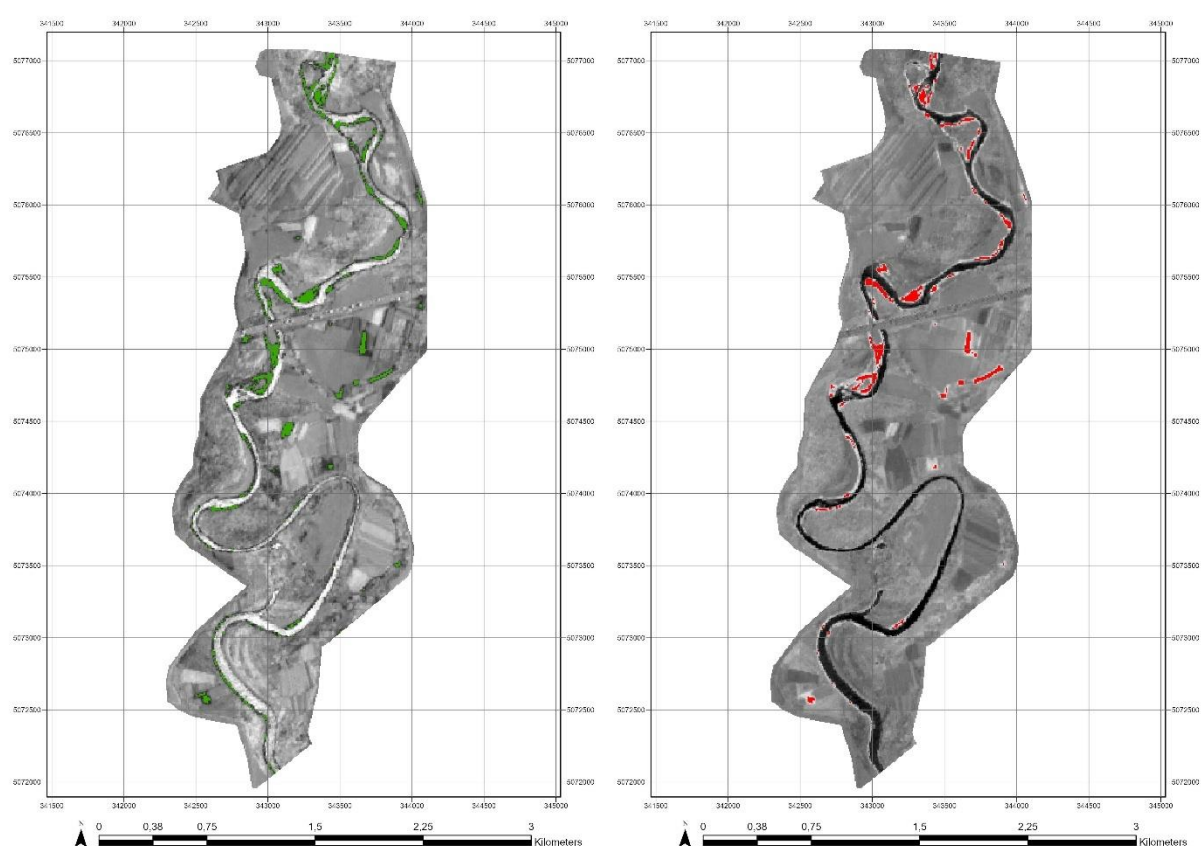


Fig. 25. Evento 01/04/2024-03/04/2024. Zone evidenziate dal Change Detection Wizard per gli indici NDVI ed NDWI

Per quanto riguarda l'indice NDVI, scarto fra raster “post” e “pre” è stato calcolato anche con il *Raster Calculator* secondo la seguente equazione

$$\Delta NDVI = NDVI_{post} - NDVI_{pre} = \frac{NIR_{post} - RED_{post}}{NIR_{post} + RED_{post}} - \frac{NIR_{pre} - RED_{pre}}{NIR_{pre} + RED_{pre}} \quad (4)$$

e simbolizzato in scala *diverging* a cinque intervalli (Tab. 8).

Classe	Range $\Delta NDVI$	Descrizione	Colore
1	-1,00 – -0,15	stress forte	Rosso
2	-0,15 – -0,05	stress lieve	Arancione
4	-0,05 – 0,05	stabilità	Giallo
4	0,05 – 0,15	ripresa	Verde chiaro
5	0,15 – 1,00	vigoria marcata	Verde scuro

Tab. 8. Intervalli $\Delta NDVI$

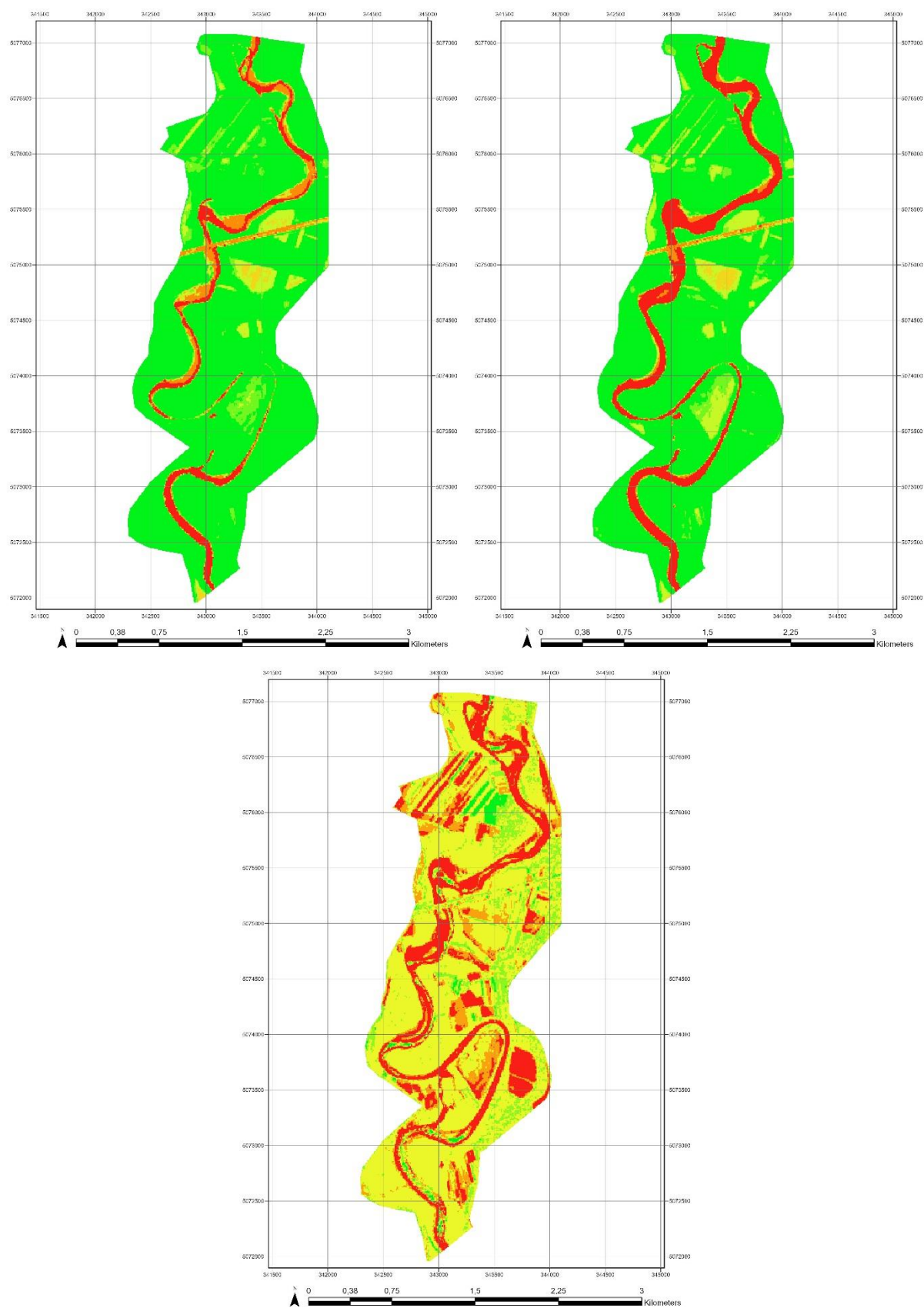


Fig. 26. Evento 27/09/2024-29/09/2024. NDVI pre-evento, NDVI post-evento, NDVI-differenziale

Nel complesso, l'uso combinato di idrometri e Sentinel-2 offre un quadro multi-scala robusto: i livelli d'acqua indicano quando innescare la ricerca satellitare e il satellite conferma se lo stress è

percepibile a scala di alveo. I risultati numerici di questo set di nove piene verranno illustrati nel capitolo successivo.

4.9. Profili climatici stagionali (2018-2025) e telerilevamento Sentinel-2: un set di reference per la vegetazione ripariale

Il comportamento della vegetazione fluviale non dipende soltanto dai picchi di piena; è fortemente modulato dal clima di fondo. In linea con approcci consolidati nello studio delle dinamiche ripariali, si è scelto di ancorare la lettura multi-annuale degli indici spettrali Sentinel-2 a due “finestre climatiche stabili” di ogni anno: la prima nel periodo in cui le piante arbustive riposano, ma il suolo può essere saturo d’acqua, e la seconda al culmine della stagione fotosinteticamente attiva [90].

I dati delle stazioni meteorologiche di Codroipo, Lignano Sabbiadoro, San Vito al Tagliamento, Talmassons e Palazzolo dello Stella sono stati scaricati in CSV dal portale “Regione FVG – Osservatorio Meteo”. Ogni file è stato importato in Excel, dove è stata calcolata la media mensile e della decade (Tab. 9). I grafici di temperatura sono stati ricomposti generando un pannello unico che evidenzia il gradiente nord-sud: Codroipo e San Vito mostrano l’escursione più ampia, Lignano e Palazzolo la più attenuata. In tutti i siti il mese più freddo è gennaio (media 2–4 °C) e il più caldo luglio (media 24–26 °C). Questa costanza consente di assumere quei mesi come “istantanee” climatologiche.

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2018	5,2	3,3	7,2	15,9	19,9	21,9	23,6	24,3	19,8	15,0	10,3	3,4
2019	1,9	5,8	9,5	13,1	14,8	24,5	23,6	24,0	18,3	14,4	10,4	6,1
2020	4,1	7,1	9,5	14,4	17,9	20,7	23,3	24,1	20,0	13,2	8,4	5,9
2021	3,0	7,1	8,0	11,0	15,2	23,1	23,5	22,1	19,2	12,0	8,9	3,4
2022		5,6	7,5	11,9	19,8	24,0	25,7	24,2	18,1	16,1	9,7	6,2
2023	5,8	5,1	10,0	11,8	18,3	22,3	24,1	23,8	21,3	16,5	8,3	5,7
2024	4,0	8,4	10,9	13,7	17,5	22,0	25,7	26,2	18,9	15,3	7,4	4,6
2025	5,7	6,2	10,1									
Media	4,24	6,08	9,09	13,11	17,63	22,64	24,21	24,10	19,37	14,64	9,06	5,04
Dev.st	1,45	1,53	1,35	1,70	2,01	1,31	1,04	1,19	1,10	1,59	1,12	1,24

Tab. 9. Profilo climatico: temperature registrate dalla stazione di Codroipo espresse in C°

Per ciascun anno (2018-2024 compresi, più gennaio-febbraio 2025) si è cercata sul Copernicus Open Access Hub la prima scena Sentinel-2 L2A BOA con nuvolosità < 10% acquisita:

- 1) fra il 5 e il 20 gennaio;
- 2) fra il 5 e il 20 luglio.

Quando non era disponibile una coppia di immagini fruibili in quelle finestre, la ricerca è stata estesa di cinque giorni. Tutte le scene sono state scaricate ed inserite in ArcGIS Pro.

Su ogni immagine è stato calcolato l’indice NDVI ed NDWI

Per mantenere coerenza con le analisi precedenti, gli NDVI sono stati ricodificati nelle sette classi ecologiche e gli NDWI nelle cinque classi idrologiche (Fig. 27). È stata rigenerata la *Raster Attribute Table*, ottenendo per ciascuna scena il numero di pixel per classe e l’area corrispondente.

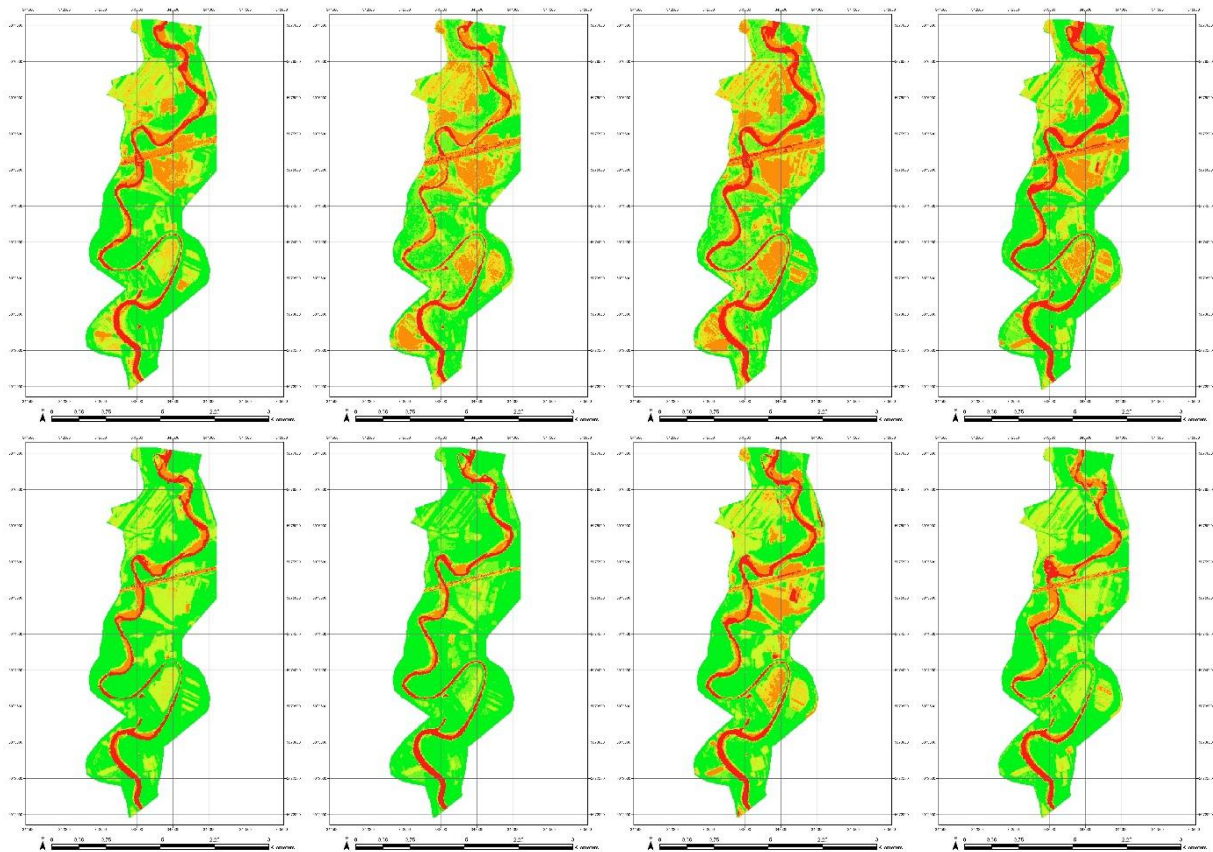


Fig. 27. Indici NDVI nel periodo Gennaio 2018-2025

L'adozione di finestre temporali fisse, corrispondenti ai mesi di gennaio e luglio, consente di attenuare le oscillazioni dovute alla fenologia stagionale, rendendo più confrontabili tra loro le immagini multi-annuali. Questa scelta metodologica permette di isolare meglio le variazioni strutturali e idromorfologiche della vegetazione rispetto alle fluttuazioni fisiologiche, riducendo l'ambiguità interpretativa che spesso compromette l'analisi di serie NDVI estese nel tempo. Tuttavia, con una risoluzione di 10 metri per pixel, le discontinuità minori del paesaggio fluviale rientrano nella dimensione sub-pixel: l'indice NDVI restituisce pertanto una risposta incapace di cogliere le variazioni puntuali più marcate. In questo contesto, le immagini Sentinel-2 si configurano come un indicatore sintetico dello stato ecosistemico su scala territoriale, utile a identificare traiettorie generali di cambiamento. La conferma e la lettura fine di tali dinamiche richiedono tuttavia osservazioni a più alta risoluzione, affidate a campagne UAV mirate.

4.10. Mappatura di cinque eventi di piena (2018-2025) con Sentinel-1 SAR

I picchi idrometrici registrati lungo il Tagliamento non sempre coincidono con condizioni di cielo sereno; quando nuvole o precipitazioni impediscono l'uso dell'ottico è necessario ricorrere al radar. La missione Sentinel-1 dell'ESA, costituita da due satelliti in banda C ($\lambda \approx 5,6$ cm) operativi dal 2014, fornisce immagini SAR acquisite di giorno e di notte, in qualunque condizione atmosferica. In modalità IW (*Interferometric Wide swath*) SLC (*Single Look Complex*), i dati offrono una risoluzione di 5x20 m e un tempo di rivisita di 6 giorni [91]. Il segnale retro-diffuso da superfici d'acqua lisce è molto debole, mentre terreno vegetato o ghiaie umide restituiscono valori più alti; questa differenza rende Sentinel-1 uno strumento privilegiato per la mappatura rapida delle aree allagate [92].

Dai grafici idrometrici di Madrisio, Latisana-1 e Latisana-2 sono stati individuati cinque eventi che nel periodo 2018-2025 superano o si avvicinano alla soglia di 2° presidio (2,70 m per la stazione Latisana1 e 5,40 per la stazione Madrisio).

#	Periodo	Giornata di picco
1	28/10/2018-03/11/2018	02/11/2018
2	15/11/2019-18/11/2019	17/11/2019
3	24/10/2023-06/11/2023	03/11/2023
4	30/03/2024-04/04/2024	02/04/2024
5	15/05/2024-19/05/2024	17/05/2024
6	09/10/2024-20/10/2024	09-11-19/10/2024

Per ognuno (tranne che per il periodo aprile 2024 per assenza di dati utilizzabili) si è scaricata una coppia di scene Sentinel-1 IW-SLC: l'immagine più vicina prima del picco ($t_0 - 14$ giorni) e la prima durante l'evento ($t_0 + 1$ giorno), entrambe con polarizzazione VV-VH. I file, in formato SAFE, provengono dall'*Alaska Satellite Facility* (VERTEX) [93].

L'elaborazione è stata eseguita in ESA SNAP 9.0 seguendo una catena standardizzata (Fig. 28); di seguito il dettaglio di ogni comando eseguito, con la sua funzione specifica.

1. *Radar > Sentinel-1 TOPS > S-1 TOPS Split* (strumento che permette di isolare il subswat e il burst di interesse);
2. *Radar > Apply Orbit File* (strumento che permette di aggiornare i metadati con le orbite precise);
3. *Radar > Radiometric > Calibrate* (strumento che permette di trasformare l'immagine che rappresenta la potenza del segnale ricevuto in un'immagine che rappresenta la riflettività del terreno);
4. *Radar > Sentinel-1 TOPS > S-1 TOPS Deburst* (strumento che permette di rimuovere i bordi esterni dal burst che sono rappresentati in colore nero);
5. *Radar > Coregistration > Stack Tools > Create Stack* (l'operatore consente di collocare due prodotti spazialmente sovrapposti. Collocare due prodotti implica che i valori dei pixel di un prodotto (il secondario) vengano ricampionati nel raster geografico dell'altro (il riferimento));
6. *Radar > Geometric > Terrain Correction > Range-Doppler Terrain Correction* (a causa delle variazioni topografiche di una scena e dell'inclinazione del sensore satellitare, le distanze possono essere distorte nelle immagini SAR. Le correzioni del terreno servono a compensare queste distorsioni in modo che la rappresentazione geometrica dell'immagine sia il più possibile fedele alla realtà);
7. *Spatial Subset from View* (ritaglio su area di interesse);
8. *Radar > Speckle Filtering > Single Product Speckle Filter* (le immagini SAR presentano una texture intrinseca chiamata "speckle", che degrada la qualità dell'immagine e rende più difficile l'interpretazione delle caratteristiche. Gli

speckle sono causati dall'interferenza casuale, costruttiva e distruttiva, delle onde di ritorno sfasate ma coerenti, diffuse dagli *scatter* elementari all'interno di ciascuna cella di risoluzione. La riduzione del rumore *speckle* può essere applicata tramite filtraggio spaziale);

9. *Color Manipulation > Switch to logarithmic display > Auto-adjust to 2 sigma (95,45%) of all pixel > Apply to other bands;*
10. *Analysis > Histogram* (analisi su ROI Mask creata su area di allagamento per individuazione valore riflettanza acqua);
11. *Band Maths* (realizzazione di maschera su immagine intra-evento per imponendo il valore “< al valore di riflettanza dell’acqua);
12. *Raster > Data Conversion > Band Select* (esportazione delle maschere di allagamento).

Le “*Event Mask*” esportate sono state sovrapposte alle foto satellitari *True view* e mascherate rispetto alla superficie dell’alveo per individuare le aree agricole e boschive allagate durante gli eventi di piena analizzati.

Il risultato è un dataset binario di allagamento che, importato in ArcGIS Pro, consente analisi di intersezione con uso del suolo, infrastrutture, ed eventualmente calcolo di tempo di allagamento se si dispone di serie temporali.

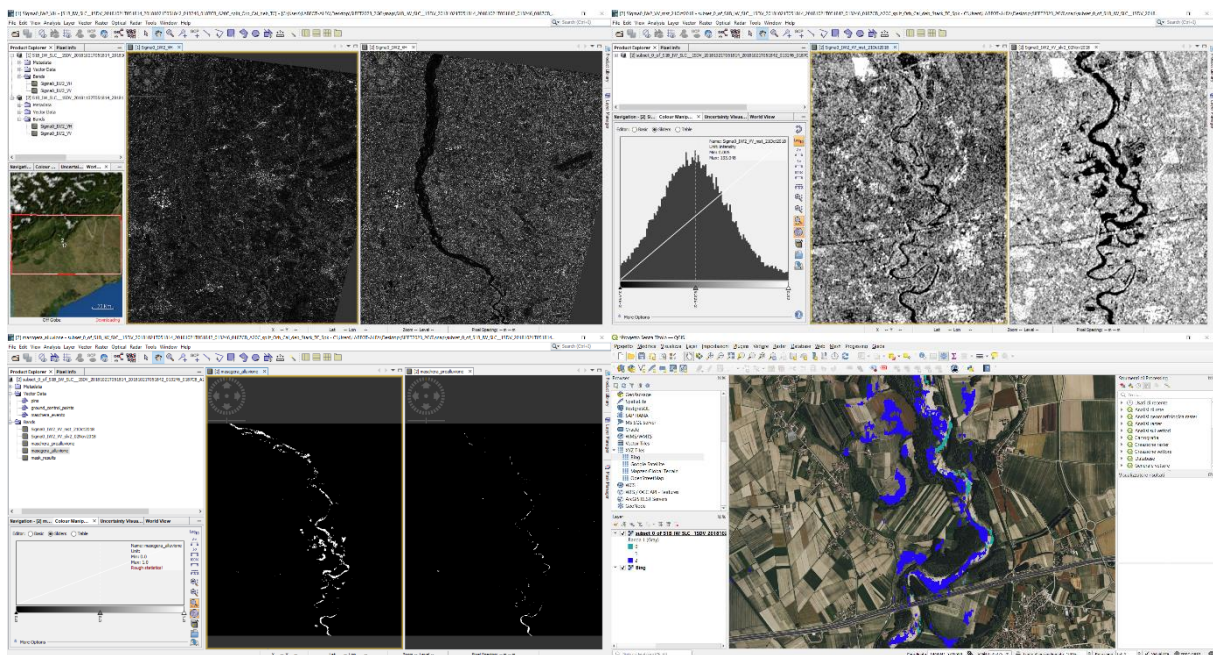


Fig. 28. Fasi di elaborazione dei dati Sentinel-1 in SNAP

In combinazione con i dati NDVI/NDWI e con i rilievi UAV, la maschera Sentinel-1 fornisce un’informazione aggiuntiva, mostrando la posizione in cui l’acqua si è effettivamente distribuita durante la piena; ciò completa il quadro delle modifiche morfologiche e bio-fisiche della porzione di corridoio fluviale analizzato.

5. Risultati e discussione

5.1. Risultati delle analisi tridimensionali da nuvole di punti

Le nuvole di punti ottenute dai rilievi fotogrammetrici da UAV multi-temporali sono state analizzate in CloudCompare per quantificare le variazioni morfologiche del fiume nel tratto di Ronchis. In particolare, si è eseguito un confronto C2C tra le nuvole di epoche successive, integrato e validato dall'estrazione di profili longitudinali e trasversali significativi “*slice*” e dal calcolo dell'erosione volumetrica. Grazie all'elevata risoluzione dei dati (centimetrica) e all'accurato orientamento delle nuvole, queste analisi hanno permesso di rilevare anche cambiamenti morfologici locali di modesta entità, distinguendoli dal rumore strumentale tramite appropriati filtri e soglie di detection [94].

La mappa di distanza C2C derivata dal confronto tra i modelli 2017-2020 regionali e quelli relativi alle epoche del rilievo mette in evidenza estese aree di erosione lungo le sponde e l'alveo attivo. Per ogni confronto effettuato (per il TF06 non sono stati effettuati confronti a causa dell'assenza di dati regionali di riferimento), i valori sono riportati di seguito (Tab. 10).

Test Field	minima (m)	media (m)	massima (m)
TF01 Reg-2023/11	0,000	53,078	96,548
TF01 2023/11-2024/04	0,000	0,765	6,501
TF02 Reg-2023/12	14,549	56,035	100,396
TF02 2023/12-2024/05	0,000	3,413	14,042
TF03 Reg-2023/09	0,000	40,111	74,023
TF03 2023/09-2024/02	0,000	10,308	39,772
TF03 2024/02-2025/02	0,711	22,423	50,942
TF04 Reg-2023/09	48,870	64,966	75,879
TF05 Reg-2023/09	0,000	6,015	33,060
TF05 2023/09-2024/02	0,000	10,614	34,368
TF05 2024/02-2025/02	0,000	17,569	48,364
TF06 Reg-2023/09	-	-	-
TF07 Reg-2023/10	18,071	33,890	53,954
TF07 2023/10-2024/05	0,000	4,428	17,336
TF07 2024/05-2025/02	0,000	5,651	17,777

Tab. 10. I risultati dell'analisi C2C sui confronti effettuati

I valori più alti (in gradazione rossa) indicano maggiori differenze rispetto alla situazione precedente, associati a processi erosivi sostanziali. Complessivamente, dal confronto tra le epoche considerate emerge un quadro di dinamica intensa delle sponde anche nel breve periodo (Fig. 29): senza considerare i confronti tra i *dataset* regionali e quelli della prima epoca per ogni tratto, interi segmenti di riva in corrispondenza di anse concave esposte alla corrente di piena hanno subito arretramenti orizzontali dell'ordine di decine di metri anche nel corso di pochi mesi (l'erosione massima è registrata nel TF03_2024/02-2025/02 e corrisponde ad un picco di 50,942m).

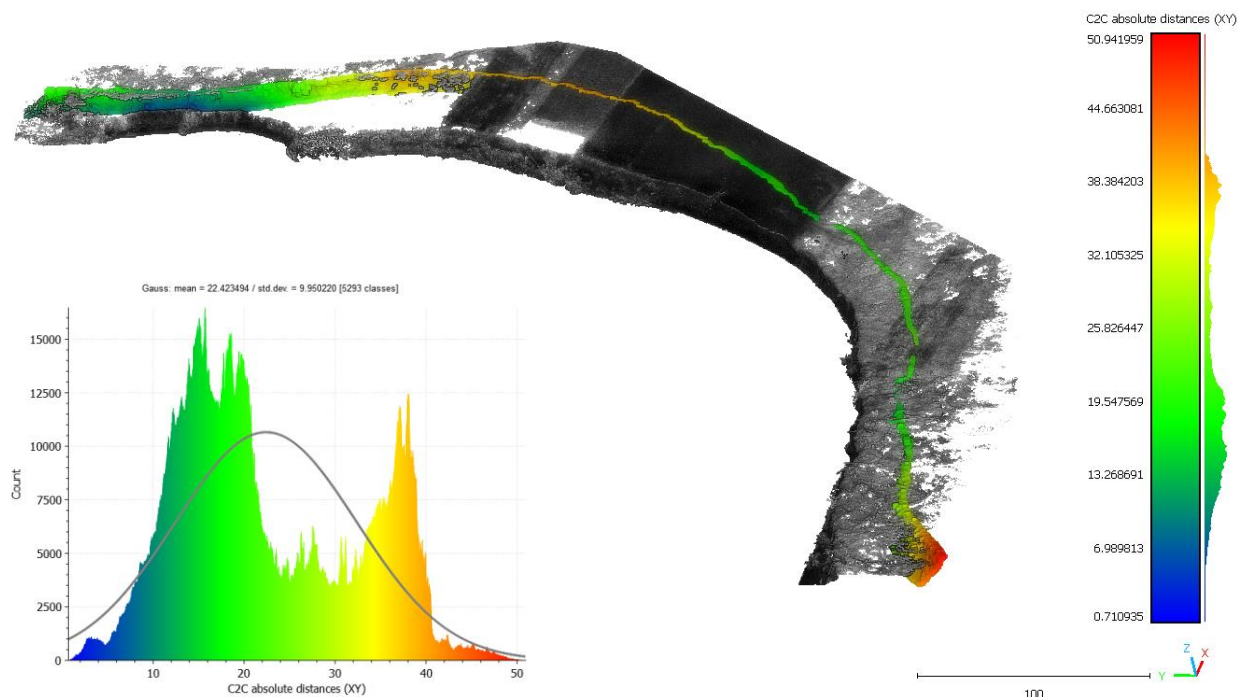


Fig. 29. TF03_2024/02-2025/02: erosione massima registrata tra due campagne di rilievo consecutive

Tali pattern erosivi indicano uno spostamento laterale dell'alveo e una parziale migrazione del corso del canale principale. Queste variazioni distribuite riflettono la naturale risposta morfodinamica del fiume all'evento di piena dove le zone di flusso ad alta energia sono associate ad erosione (trasporto solido uscente). Dai profili planimetrici spondali si apprezza un cambiamento nella morfologia di alcuni sub-tratti (Fig. 30): si notano arretramenti di alcuni metri in corrispondenza delle curve (dove aumenta la velocità e capacità di trasporto). I profili trasversali in sezioni chiave confermano l'entità degli spostamenti laterali (Fig. 31): ad esempio, nella sezione trasversale riportata di seguito (in corrispondenza di un'ansa marcata) la riva est è arretrata di ~40 m in planimetria, comportando una netta traslazione dell'alveo attivo.

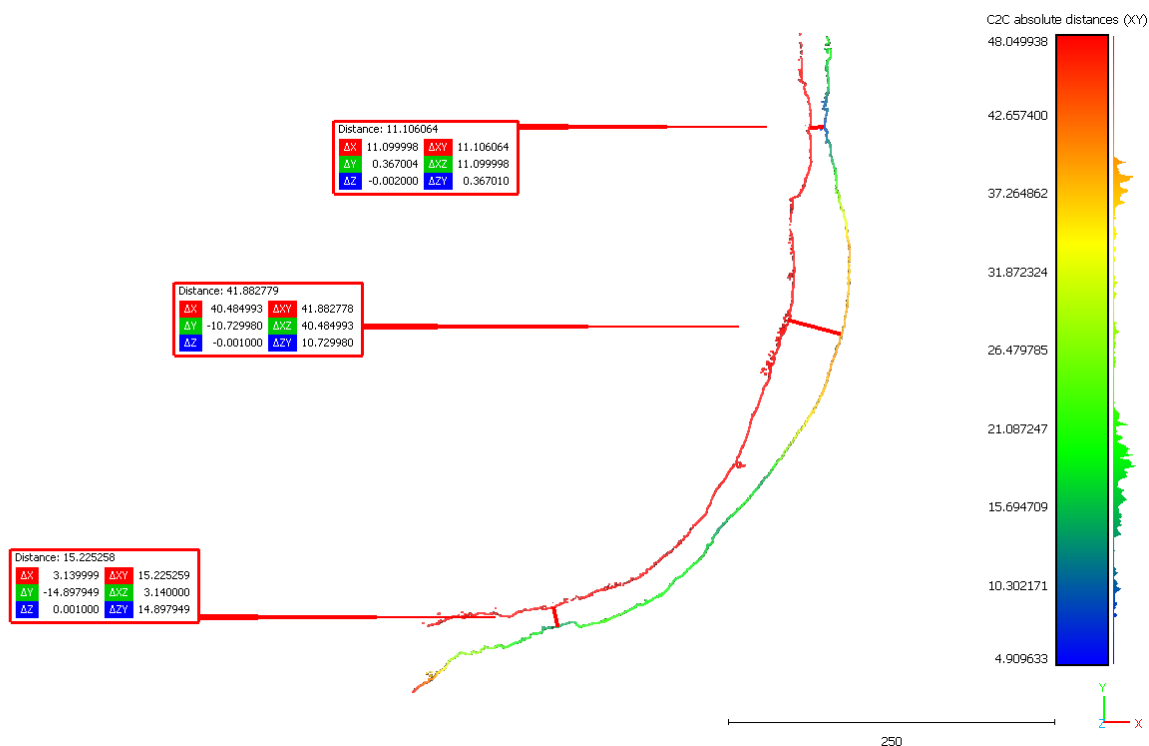


Fig. 30. TF03_2024/02-2025/02: profilo planimetrico alla quota di 5,4 m

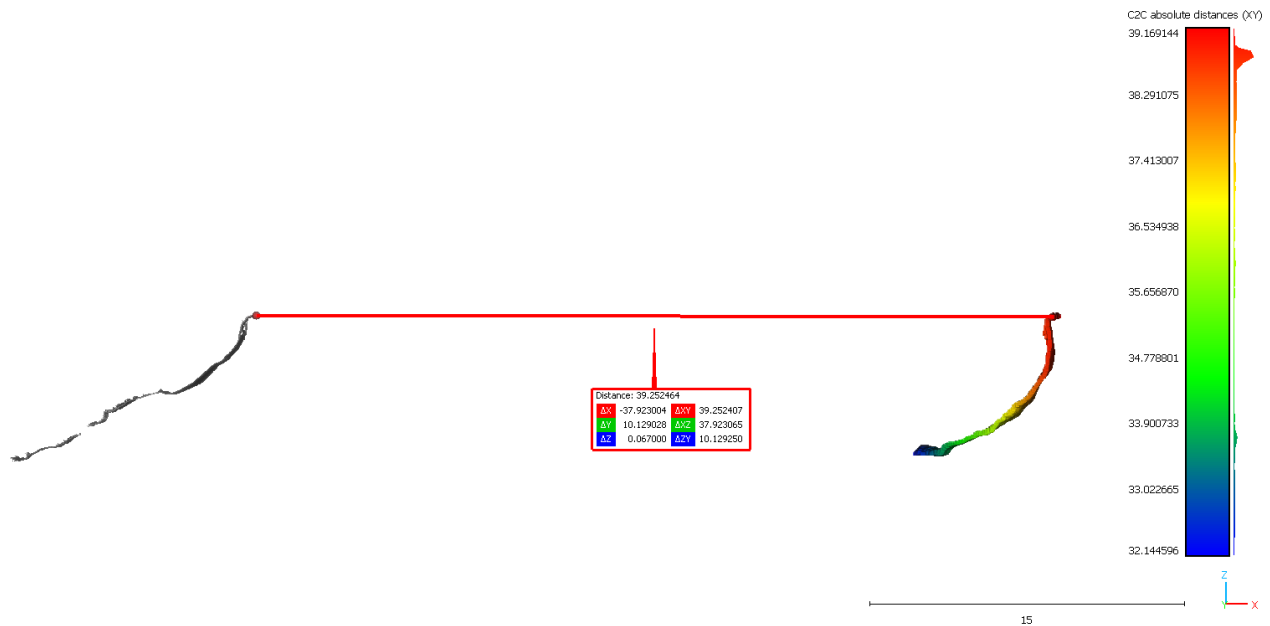


Fig. 31. TF03_2024/02-2025/02: profilo trasversale

I risultati numerici del calcolo volumetrico confermano una forte erosione di sedimenti nel periodo considerato. Il bilancio volumetrico riporta i quantitativi stimati di erosione e deposizione tra il 2017-2020 e il 2025 sull'area di studio. Gli eventi di piena hanno mobilitato un grande volume di sedimenti, e si presuppone che una parte di essi non si sia ridistribuita localmente venendo verosimilmente trasportata sulle sponde opposte, oltre i confini del tratto (verso valle) oppure in aree non rilevate. Nei casi analizzati, il bilancio risulta esclusivamente negativo (*export* di sedimento), risultato atteso e naturale considerando che in questa fase lo studio si concentra unicamente sulle sponde soggette a erosione laterale (Tab. 11)(Fig. 32).

Test Field	Volume eroso (m ³)
TF01 Reg-2023/11	164810,878
TF01 2023/11-2024/04	21034,552
TF02 Reg-2023/12	147869,847
TF02 2023/12-2024/05	16379,121
TF03 Reg-2023/09	109149,850
TF03 2023/09-2024/02	50367,812
TF03 2024/02-2025/02	125131,627
TF04 Reg-2023/09	51705,250
TF05 Reg-2023/09	24563,834
TF05 2023/09-2024/02	38175,249
TF05 2024/02-2025/02	90426,096
TF06 Reg-2023/09	-
TF07 Reg-2023/10	80099,479
TF07 2023/10-2024/05	21854,922
TF07 2024/05-2025/02	32409,292

Tab. 11. Volume eroso nelle aree oggetto di analisi C2C

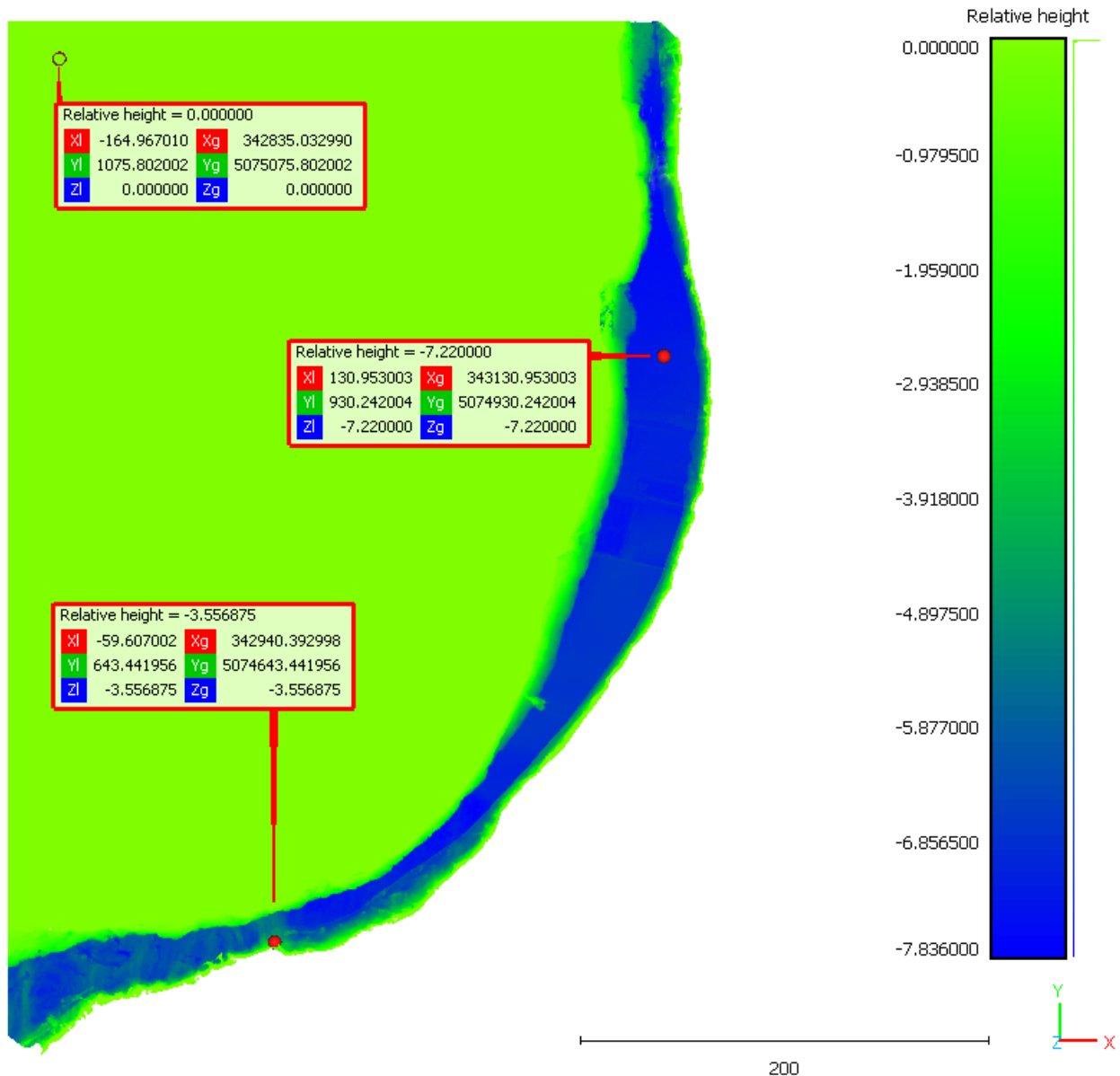


Fig. 32. TF03_2024/02-2025/02: calcolo volumetrico

Questo comportamento è in linea con osservazioni su altri tratti del Tagliamento: studi precedenti riportano che su aree che comprendono centinaia di ettari il Tagliamento tende a mostrare un bilancio quasi in pareggio o leggermente deposizionale nel breve termine, compensando erosioni localizzate con deposizioni diffuse.

Ad esempio, Rainato et al. (2013) hanno rilevato, su un tratto di ~430 ha e dopo 8 piene significative, un accumulo netto modesto (prevalenza di deposizione globale) ma con erosione predominante all'interno dello stesso tratto [94]. Ciò evidenzia come il bilancio complessivo possa mascherare importanti eterogeneità spaziali: anche nei casi analizzati nel presente studio, la distribuzione di erosioni non è uniforme, ma presenta settori nettamente erosivi e altri lievemente erosivi. È dunque fondamentale valutare la dislocazione dei cambiamenti morfologici, in modo da identificare le zone critiche (ad es. sponde in forte arretramento). Dal punto di vista geomorfologico, i risultati indicano processi attivi di migrazione laterale del canale.

I risultati confermano l'elevata dinamicità del Basso Tagliamento, coerente con la natura di un fiume in condizioni quasi naturali e soggetto a regime torrentizio: anche piene con tempi di ritorno relativamente brevi possono rimodellare sensibilmente l'alveo. È importante sottolineare che l'affidabilità di queste stime dipende dalla qualità dei dati fotogrammetrici e dell'orientamento

assoluto: nel *workflow* adottato l'errore medio di orientamento è stato mantenuto inferiore a 4 cm. Come accennato al capitolo 4.4, l'accuratezza del volume è stata valutata con un'approssimazione LoD95: per ogni confronto tra nuvole di punti sono stati calcolati i valori di *roughness* di ogni nuvola (in linea con quanto riportato dalla bibliografia è stato definito un raggio 0,4 m per i dati regionali e di 0,1 m per i dati fotogrammetrici) e prese in considerazione le precisioni calcolate grazie all'approccio della georeferenziazione diretta (per quanto riguarda i dati regionali si è assunto il valore di 0,15 m [97]). In tutti i confronti il volume minimo rilevabile su ogni area espresso dal valore LoD95,v è risultata inferiore al volume effettivamente calcolato (Tab. 12). Si riportano di seguito i valori ottenuti.

Test Field	σ_{pre} (m)	σ_{post} (m)	reg1 (m)	reg2 (m)	LoD95,z (m)	Sup. (m ²)	LoD95,v (m ²)
TF01 Reg-2023/11	0,031	0,005	0,150	0,021	0,303	62219	18863
TF01 2023/11-2024/04	0,005	0,006	0,021	0,021	0,060	58583	3526
TF02 Reg-2023/12	0,031	0,006	0,150	0,022	0,304	45276	13742
TF02 2023/12-2024/05	0,006	0,006	0,022	0,036	0,084	37785	3187
TF03 Reg-2023/09	0,028	0,005	0,150	0,034	0,307	67672	20746
TF03 2023/09-2024/02	0,005	0,005	0,034	0,031	0,091	140525	12821
TF03 2024/02-2025/02	0,005	0,009	0,031	0,027	0,083	140858	11700
TF04 Reg-2023/09	0,035	0,004	0,150	0,040	0,312	10280	3207
TF05 Reg-2023/09	0,031	0,008	0,150	0,040	0,311	10744	3337
TF05 2023/09-2024/02	0,008	0,006	0,040	0,037	0,109	73929	8027
TF05 2024/02-2025/02	0,006	0,009	0,037	0,021	0,086	84671	7285
TF06 Reg-2023/09	-	-	-	-	-	-	-
TF07 Reg-2023/10	0,023	0,008	0,150	0,031	0,304	67975	20663
TF07 2023/10-2024/05	0,008	0,004	0,031	0,040	0,101	91737	9240
TF07 2024/05-2025/02	0,004	0,004	0,400	0,040	0,111	101838	11347

Tab. 12. Calcolo dell'accuratezza del volume

Figure e tabelle chiave inserite in questo capitolo forniscono un supporto visivo ai risultati: ad esempio, la mappa C2C a colori (Fig. 24) permette di localizzare immediatamente i settori erosionali (in rosso) all'interno delle aree di studio, mentre i grafici di profilo (Fig. 30, Fig. 31) quantificano le variazioni lungo direzioni specifiche. Il bilancio volumetrico riepilogato in Tab. 11 fornisce infine una misura della mobilitazione sedimentaria in un preciso intervallo di tempo per ogni specifica area. Nel complesso, l'integrazione di queste analisi consente una lettura dettagliata dell'evoluzione morfologica recente, costituendo una base solida e validata per le valutazioni interdisciplinari (es. correlazioni con dinamiche vegetazionali ed idrologiche).

5.2. Risultati delle analisi multispettrali

Le analisi multispettrali condotte su ortofoto UAV e su immagini satellitari Sentinel-2 hanno fornito informazioni complementari riguardo alla risposta della vegetazione e della superficie idrica agli eventi di piena. Sono stati calcolati in particolare l'indice di vegetazione NDVI e l'indice idrico NDWI per diverse epoche sia a scala di dettaglio (ortofoto da fotogrammetria UAV, risoluzione 2 cm) sia a scala satellitare (immagini Sentinel-2 a 10 m).

Una fase importante del metodo ha riguardato la validazione e confronto degli indici spettrali derivati da satellite (Sentinel-2) rispetto a quelli ottenuti da fotogrammetria da drone, che rappresentano un "riferimento" ad altissima risoluzione. Questo confronto è servito per capire in che misura le informazioni a risoluzione più grossolana (10 m) possano cogliere le variazioni puntuali osservate a scala fine, e per calibrare/interpretare correttamente i valori satellitari. Come indicato in precedenza, le analisi comparative sono state impostate già nel capitolo 4 (sezioni 4.6 e 4.7) come parte del metodo, prima di passare ai risultati finali. In particolare, si sono svolte le seguenti operazioni:

- comparazione quantitativa NDVI: si sono confrontate le mappe NDVI UAV e Sentinel-2 per le stesse date. Per farlo, si è effettuato un confronto puntuale e statistico: campionando posizioni casuali nell'area di studio e compiendo un'analisi di distribuzione calcolando l'estensione areale coperta da ciascuna classe su ciascuna piattaforma, dopo aver suddiviso i valori NDVI in classi di intervallo (Tab. 13, Tab. 14).

In generale, è emerso che l'NDVI da Sentinel-2 tende a sottostimare i valori posti negli intervalli estremi (1 e 7) rispetto all'UAV, mentre negli intervalli centrali i valori di Sentinel-2 sono simili o sovrastimati rispetto a quelli da UAV. Questo è plausibile poiché il pixel 10 m mescola contributi di vegetazione e suolo nudo così come di vegetazione e acqua/soilo nudo, risultando in NDVI mediamente "appiattiti". Questo effetto di "appiattimento spettrale" è ben documentato nella letteratura scientifica [95][96], ed è una conseguenza diretta dell'effetto mixed pixel, particolarmente rilevante nelle aree fluviali caratterizzate da forte eterogeneità e discontinuità superficiale, come argini parzialmente vegetati, isole fluviali e aree alluvionali a mosaico. L'NDVI derivato da piattaforme satellitari a media risoluzione, come Sentinel-2, risente fortemente della presenza combinata di più componenti (es. acqua, sabbia, vegetazione arborea ed erbacea) all'interno dello stesso pixel, riducendo la variabilità spettrale osservata e generando valori più centrali nella distribuzione dell'indice. Al contrario, i sensori montati su UAV ad altissima risoluzione (2 cm nel presente studio) permettono una segmentazione spaziale più accurata delle coperture, restituendo valori più estremi e specifici nei contesti microambientali.

Questa tendenza si osserva chiaramente nelle analisi comparative per le epoche del primo rilievo in ogni *Test Field* (TF03-1, TF05-1, TF07-1), dove le classi corrispondenti agli intervalli più elevati (es. 0,741 – 1) e più bassi (es. -1 – 0,015) risultano sottorappresentate nei dati Sentinel-2. All'opposto, le classi centrali (0,016 – 0,74) mostrano un'eccessiva rappresentazione, frutto della mediazione radiometrica operata dalla maggior dimensione del pixel. Questo fenomeno è legato al periodo di rilievo (TF03-1: 09/09/2023; TF05-1: 10/09/2023; TF07-1: 28/10/2023), quando la copertura vegetale si trova in una fase fenologica eterogenea: a inizio settembre (TF03-1 e TF05-1) la colonizzazione erbacea sulle barre ghiaiose e sabbiose è già parzialmente in fase di regresso e la componente arbustiva-arborea ha iniziato la transizione autunnale, mentre alla fine di ottobre (TF07-1) molte chiome stanno perdendo clorofilla. Di conseguenza, sui raster UAV appaiono porzioni estese di vegetazione a NDVI estremamente alto giustapposte a chiazze di suolo nudo o ciottolame asciutto (NDVI basso), generando una distribuzione molto ampia di valori.

Quando però la stessa scena viene campionata da Sentinel-2 con pixel di 100 m², entrambe le componenti, suolo e vegetazione, ricadono nella stessa area radiometrica; l'indice risultante è una media che oscilla in fascia intermedia (0,2 – 0,6), sovrastimando artificialmente le classi centrali e depauperando gli estremi. L'effetto è amplificato nelle date settembrine perché il greto è ancora in gran parte asciutto dopo l'estate e le zone d'acqua libera (che darebbero NDVI < 0,015) sono ridotte: ogni pixel Sentinel-2 include dunque, oltre alla vegetazione, anche una quota rilevante di sedimento riflettente, abbassandone il valore massimo; al contrario, l'assenza di vaste superfici d'acqua impedisce di popolare la classe -1 – 0,015.

Nel rilievo di fine ottobre il contrasto si accentua: parte della vegetazione arborea ha NDVI in calo (ingiallimento fogliare), mentre la ghiaia umida per le prime piogge autunnali restituisce riflettanze leggermente più alte, spostando ulteriore superficie verso le classi centrali. I sensori multispettrali a bordo del drone continuano però a registrare sia nei valori alti (chiome ancora verdi) sia in quelli bassissimi (ghiaia nuda), rendendo la sovrastima satellitare delle zone centrali dell'indice ancora più evidente.

Queste considerazioni confermano che la scala di osservazione e il periodo fenologico del rilievo sono fattori decisivi nel confronto tra piattaforme: i sensori dell'UAV rimangono insostituibili per catturare la variabilità micro-ambientale tipica dei greti fluviali, mentre Sentinel-2 fornisce una lettura “integrata” che, pur attenuata, è preziosa per seguire *trend* stagionali o inter-annuali sull'intero corridoio fluviale.

Classe	Range NDVI DJI-M3M	TF03-1 (m ²)	TF03-2 (m ²)	TF03-3 (m ²)	TF05-1 (m ²)	TF05-2 (m ²)	TF05-3 (m ²)	TF07-1 (m ²)	TF07-2 (m ²)	TF07-3 (m ²)
1	-1,00 – 0,015	23728	24952	23395	22353	37327	30919	65033	56999	57641
2	0,016 – 0,15	14051	27469	46041	13544	31832	38910	2449	13722	18932
3	0,141 – 0,18	1710	6553	3584	3784	3870	9965	1468	2111	3913
4	0,181 – 0,27	3055	7593	4694	6631	7920	10294	3369	3054	7095
5	0,271 – 0,36	2459	7652	3615	4338	8937	7217	3595	2049	7595
6	0,361 – 0,77	14776	11101	4197	17770	17056	12797	21145	10182	9480
7	0,741 – 1,00	23949	65	7	37296	91	51	6827	16808	318
TOT		83728	85385	85534	105716	107034	110153	103887	104925	104974

Tab. 13. DJI-M3M: valori areali NDVI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico

Classe	Range NDVI Sentinel-2	TF03-1 (m ²)	TF03-2 (m ²)	TF03-3 (m ²)	TF05-1 (m ²)	TF05-2 (m ²)	TF05-3 (m ²)	TF07-1 (m ²)	TF07-2 (m ²)	TF07-3 (m ²)
1	-1,00 – 0,015	0	25970	23765	0	30282	31654	44492	52087	51499
2	0,016 – 0,15	5341	33957	48363	196	37289	45913	22001	10437	18718
3	0,141 – 0,18	8379	5733	4214	5096	6125	9996	5292	4508	7154
4	0,181 – 0,27	18179	6909	5096	27832	8379	9506	7497	5586	11417
5	0,271 – 0,36	10780	4655	2891	14259	7742	7448	4214	4802	8232
6	0,361 – 0,77	29498	8820	1715	42287	20384	5684	21021	16611	8771
7	0,741 – 1,00	13867	0	0	20531	0	0	1274	11760	0
TOT		86044	86044	86044	110201	110201	110201	105791	105791	105791

Tab. 14. Sentinel-2: valori areali NDVI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico

- comparazione quantitativa NDWI: analogamente si è proceduto per l'NDWI, campionando posizioni casuali nell'area di studio e compiendo un'analisi di distribuzione calcolando l'estensione areale coperta da ciascuna classe su ciascuna piattaforma, dopo aver suddiviso i valori NDWI in classi di intervallo (Tab. 15, Tab. 16). Dalle tabelle di confronto emergono alcune differenze: i valori dei pixel da sensori UAV e Sentinel-2 presentano valori NDWI simili nel range 1 (-1,00 – 0,00) in tutti i rilievi, mentre differiscono di molto nei range 4 e 5 (0,501 – 0,7 e 0,71 – 1,00), in cui i pixel di Sentinel-2 segnalano umidità anche dove i sensori dell'UAV non evidenzia acqua superficiale se non molto localizzata, o risultando completamente assente rispetto ai pixel da sensori UAV, specialmente per le epoche del primo rilievo in ogni *Test Field* (TF03-1: 09/09/2023; TF05-1: 10/09/2023; TF07-1: 28/10/2023). Ciò può dipendere da due fattori concomitanti:

1. effetto *mixed-pixel* sui ristagni: i ristagni d'acqua che permangono nei solchi ghiaiosi/sabbiosi dopo l'estate secca, o nelle piccole depressioni di barra, hanno dimensioni tipicamente dell'ordine di pochi decimetri. I sensori del drone, lavorando a 2 cm di GSD, li individuano puntualmente e producono *cluster* di NDWI > 0,70 che rientrano nelle classi 4-5. Sentinel-2, con una risoluzione di 100 m² per pixel, comprende al suo interno suolo asciutto, ghiaia ancora umida e pozze sub-pixel: il contributo dell'acqua viene diluito e l'indice ricade in intervalli intermedi (0,30 – 0,50) o addirittura annullato, spiegando la drastica sottorappresentazione, o l'assenza, delle classi 4 e 5 nei dati satellitari per i voli di settembre e ottobre;
2. soglia di sensibilità all'umidità superficiale: l'indice NDWI è noto per essere estremamente sensibile alla presenza di acqua libera, ma meno al contenuto idrico del suolo quando questo è poco umido [98]. Di conseguenza, quando il greto è essenzialmente asciutto, sia i sensori UAV sia Sentinel-2 concordano sulla dominanza della classe 1 (-1,00 – 0,00), mentre subito dopo gli eventi autunnali o primaverili i sensori UAV registrano un aumento netto dei pixel in classe 4-5, associato a ristagno parziale, che però non viene registrato da Sentinel-2 perché l'umidità elevata occupa meno del 15-20% del pixel e non supera la soglia di classificazione.

Classe	Range NDWI DJI-M3M	TF03-1 (m ²)	TF03-2 (m ²)	TF03-3 (m ²)	TF05-1 (m ²)	TF05-2 (m ²)	TF05-3 (m ²)	TF07-1 (m ²)	TF07-2 (m ²)	TF07-3 (m ²)
1	-1,00 – 0,00	62118	60460	64034	83011	73631	79182	39416	48158	47935
2	0,001 – 0,30	2623	3095	4137	2756	5720	2946	63544	1792	1245
3	0,301 – 0,50	3573	2457	8053	4431	2823	8836	912	6796	2626
4	0,501 – 0,70	8462	5101	9304	11916	11174	19179	9	47891	39465
5	0,701 – 1,00	6953	14280	6	3612	13689	10	5	282	13707
TOT		83729	85394	85534	105725	107037	110153	103886	104919	104978

Tab. 15. Sentinel-2: valori areali NDWI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico

Classe	Range NDWI Sentinel-2	TF03-1 (m ²)	TF03-2 (m ²)	TF03-3 (m ²)	TF05-1 (m ²)	TF05-2 (m ²)	TF05-3 (m ²)	TF07-1 (m ²)	TF07-2 (m ²)	TF07-3 (m ²)
1	-1,00 – 0,00	83006	61789	65905	108976	80850	79625	62720	52724	52430
2	0,001 – 0,30	3038	7007	9163	1225	7693	11368	24157	6860	8820
3	0,301 – 0,50	0	3479	5243	0	6174	9800	18914	4263	4802
4	0,501 – 0,70	0	4998	5047	0	6468	8330	0	9457	12348
5	0,701 – 1,00	0	8771	686	0	9016	1078	0	32487	27832
TOT		86044	86044	86044	110201	110201	110201	105791	105791	106232

Tab. 16. Sentinel-2: valori areali NDWI relativi alle giornate di rilievo aerofotogrammetrico

La seconda fase dell'analisi multispettrale su Sentinel-2 è stata dedicata al monitoraggio degli effetti di nove piene verificatesi fra settembre 2023 e marzo 2025. Partendo dalle scene pre-evento e post-evento, per ciascun episodio è stata calcolata la variazione areale delle sette classi NDVI e delle cinque classi NDWI definite nei capitoli precedenti. Le tabelle di sintesi evidenziano *trend* ricorrenti (Tab. 17, Tab. 18): in sette piene su nove la superficie ricadente nel massimo intervallo NDVI (0,741 – 1,00) diminuisce, mentre cresce quella nel range più basso (0,001 – 0,015). Parallelamente, l'NDWI mostra una contrazione della classe più negativa (-1,00 – -0,20, suoli asciutti) e un aumento nei range intermedi (0,001 – 0,50); l'unica eccezione riguarda i due eventi minori di fine febbraio e fine marzo 2024.

NDVI		-1,-0,015 (m ²)	0,016-0,14 (m ²)	0,141-0,18 (m ²)	0,181-0,27 (m ²)	0,271-0,36 (m ²)	0,361-0,74 (m ²)	0,741-1,00 (m ²)
Intervallo 01	22/10/2023	458738	164689	203448	783951	363776	1189573	1189573
	11/11/2023	759206	630973	466480	509208	295715	2626498	475692
		300468	466284	263032	-274743	-68061	1436925	-713881
Intervallo 02	29/11/2023	448546	688989	494312	742105	443744	2863854	82124
	16/12/2023	467019	770819	552475	761803	510727	2674665	26166
		18473	81830	58163	19698	66983	-189189	-55958
Intervallo 03	19/02/2024	458836	939330	446439	805609	754894	2342347	15631
	05/03/2024	628033	783510	356916	712558	888076	2364642	29939
		169197	-155820	-89523	-93051	133182	22295	14308
Intervallo 04	05/03/2024	628033	783510	356916	712558	888076	2364642	29939
	25/03/2024	502250	638225	376712	510531	456092	3031140	248724
		-125783	-145285	19796	-202027	-431984	666498	218785
Intervallo 05	25/03/2024	502250	638225	376712	510531	456092	3031140	248724
	07/04/2024	704718	637735	315119	449526	431690	3008551	216335
		202468	-490	-61593	-61005	-24402	-22589	-32389
Intervallo 06	29/04/2024	446047	815850	315413	329280	259259	980588	2617237
	18/06/2024	554435	193354	138327	350399	472850	1764098	2290211
		108388	-622496	-177086	21119	213591	783510	-327026
Intervallo 07	21/09/2024	311101	241766	86828	241472	279496	1257732	3345279
	29/09/2024	657629	111867	71540	352261	257054	1306291	3007032
		346528	-129899	-15288	110789	-22442	48559	-338247
Intervallo 08	29/09/2024	657629	111867	71540	352261	257054	1306291	3007032
	29/10/2024	619360	269451	184142	629160	473879	2471511	1116171
		-38269	157584	112602	276899	216825	1165220	-1890861
Intervallo 09	17/01/2025	365001	430318	216629	1114750	758863	2866843	11270
	03/02/2025	501319	435071	218785	1040613	835793	2723861	8232
		136318	4753	2156	-74137	76930	-142982	-3038

Tab. 17. Valori areali NDVI pre e post evento

NDWI		-1,0 - -0,20 (m ²)	-0,20 - 0,00 (m ²)	0,001 - 0,30 (m ²)	0,301 - 0,50 (m ²)	0,501 - 0,70 (m ²)	0,701 - 1,00 (m ²)
Intervallo 01	22/10/2023	5116678	182476	122892	224322	117404	0
	11/11/2023	4781077	267295	257103	441490	14357	2450
		-335601	84819	134211	217168	-103047	2450
Intervallo 02	29/11/2023	5052880	250292	106526	84427	129556	139993
	16/12/2023	4974186	301987	109760	67620	102067	208054
		-78694	51695	3234	-16807	-27489	68061
Intervallo 03	19/02/2024	4761526	541989	107359	58506	68502	225792
	05/03/2024	4806606	341579	138572	209720	248969	18228
		45080	-200410	31213	151214	180467	-207564
Intervallo 04	05/03/2024	4806606	341579	138572	209720	248969	18228
	25/03/2024	4859085	378917	106183	70609	118874	230006
		52479	37338	-32389	-139111	-130095	211778
Intervallo 05	25/03/2024	4859085	378917	106183	70609	118874	230006
	07/04/2024	4561655	505288	312228	374899	9604	4410
		-297430	126371	206045	304290	-109270	-225596
Intervallo 06	29/04/2024	4844875	451633	110299	81046	159887	115934
	18/06/2024	4948118	229124	244216	342216	0	0
		103243	-222509	133917	261170	-159887	-115934
Intervallo 07	21/09/2024	5126625	251468	112602	109172	106918	56889
	29/09/2024	4975313	153125	311493	290080	23618	10045
		-151312	-98343	198891	180908	-83300	-46844
Intervallo 08	29/09/2024	4975313	153125	311493	290080	23618	10045
	29/10/2024	4887015	260582	162288	189581	235298	28910
		-88298	107457	-149205	-100499	211680	18865
Intervallo 09	17/01/2025	5014415	342020	126077	89327	110005	81830
	03/02/2025	4896472	369068	130340	81977	162288	123529
		-117943	27048	4263	-7350	52283	41699

Tab. 18. Valori areali NDWI pre e post evento

Questa dinamica spettrale è coerente con il rapporto tra disturbo fluviale e risposta della vegetazione tipica dei corridoi intrecciati alpini e meandriiformi in cui durante le piene più energetiche

(ottobre/novembre 2023, aprile 2024, maggio 2024, ottobre 2024) l'impeto della corrente erode le sponde e la vegetazione che insiste su di esse (asportazione di biomassa), riducendo drasticamente i pixel ad alta vigoria fotosintetica; l'NDVI satellitare ne registra il declino immediato con un arretramento della classe 7.

Il calo di NDVI è accompagnato da un aumento di NDWI nelle classi centrali. Non si tratta di nuova acqua libera su larga scala (a meno di livelli idrometrici elevati al momento dell'acquisizione, che produrrebbe $NDWI > 0,70$), bensì di suoli sabbiosi intrisi d'acqua, che al sensore radar-ottico risultano come incremento moderato dell'indice (0,10 – 0,50). Tali valori, peraltro, ricadono precisamente nella gamma associata a sedimenti bagnati ma non allagati [99].

Questi risultati consentono di presupporre che le piene con colmo, anche quelle meno che non superano il livello di 1° presidio, sono sufficienti a ridisporre l'equilibrio tra suolo nudo e copertura vegetale nel Tagliamento medio-basso, effetto rilevabile anche a 10 m di pixel.

All'interno di questa fase, l'impiego del *Change Detection Wizard* di ArcGIS Pro si è rivelato cruciale per isolare, mappare e quantificare le superfici che, anche a distanza di alcuni giorni dall'onda di piena, manifestano ancora tracce idromorfologiche dell'evento. Il *workflow* ha consentito di calcolare le mappe di differenza per NDVI e NDWI fra le scene pre- e post-piena e la generazione delle "change masks".

L'analisi spaziale delle maschere evidenzia che, nella quasi totalità dei casi, le aree a $\Delta NDWI$ positivo coincidono con quelle a $\Delta NDVI$ negativo: la piena rimuove la vegetazione, riducendo l'attività fotosintetica (calo NDVI) e lasciando sedimenti o suoli fradici che riflettono più debolmente in NIR (aumento NDWI). Questa correlazione rafforza la validità di entrambi gli indici come strumenti sinergici nell'analisi del disturbo delle piene all'ecosistema. Sovrapponendo l'immagine *True Color*, NDVI e NDWI pre-evento e alle maschere dei cambiamenti è stato possibile mappare con precisione le aree di maggiore suscettibilità all'erosione, nonché individuare hot-spot di ristagno prolungato legati alla morfologia territoriale o alla composizione geologica (Fig. 33, in rosso).

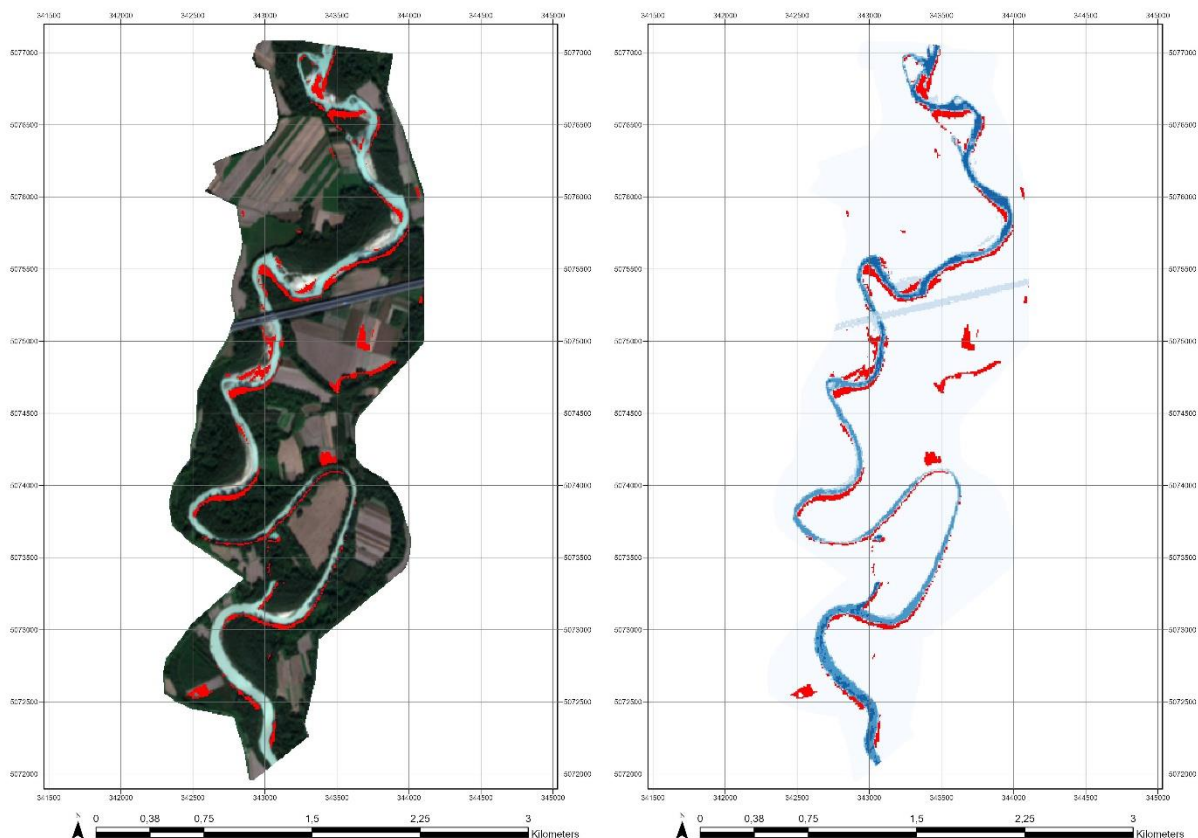


Fig. 33. Maschera NDWI estratta dal Change Detection Wizard sovrapposta alle immagini True Color ed NDWI pre-evento

Dal punto di vista analitico, i risultati relativi alla variazione ΔNDVI restituiscono un quadro molto coerente con la cronologia idrologica e con la fenologia ripariale osservata sul campo (Tab. 19).

		stress forte (%)	stress lieve (%)	Stabilità (%)	Ripresa (%)	vigoria marcata (%)
		-1,00 – -0,15	-0,15 – -0,05	-0,05 – 0,05	0,05 – 0,15	0,15 – 1,00
Intervallo01	31/10/2023- 04/11/2023	41,51	37,08	14,34	5,31	1,76
Intervallo02	02/12/2023- 03/12/2023	8,58	34,87	51,01	4,00	1,55
Intervallo03	23/02/2024- 25/02/2024	5,01	12,23	65,14	12,84	4,77
Intervallo04	11/03/2024- 12/03/2024	2,56	3,48	25,65	35,91	32,40
Intervallo05	01/04/2024- 03/04/2024	7,69	18,98	46,20	18,88	8,25
Intervallo06	16/05/2024- 18/05/2024	10,59	36,15	21,22	11,69	20,36
Intervallo07	27/09/2024- 29/09/2024	19,22	12,74	56,48	9,80	1,76
Intervallo08	09/10/2024- 20/10/2024	45,42	32,61	11,65	4,43	5,89
Intervallo09	28/01/2025- 29/01/2025	7,51	21,08	59,90	9,92	1,59

Tab. 19. Classi ΔNDVI

L'intervallo 01 (piena di fine ottobre – inizio novembre 2023), caratterizzato dal colmo idrometrico più elevato del biennio, mostra il secondo valore percentuale di stress forte più alto in assoluto (41,5%) e, la seconda quota di stabilità più bassa (14,3%). In pratica quasi due terzi dei pixel dell'area indagata subiscono un calo dell'indice NDVI superiore a 0,15, evidenza di un'asportazione massiccia di vegetazione o di deposito di sedimenti fini che mascherano la riflettanza del verde. L'altro evento marcatamente impattante è l'intervallo 08 (piena di metà ottobre 2024), dove la classe di stress forte sale al 45,4% e la stabilità scende all'11,7%; anche qui lo scenario post-evento è dominato da suoli denudati e vegetazione danneggiata o stressata.

All'estremo opposto si colloca l'intervallo 04 (11–12 marzo 2024), una piena minore in un periodo in cui la vegetazione riparia è in ripresa primaverile. Solo il 2,6% dei pixel ricade in stress forte, mentre oltre il 68% rientra nelle classi ripresa e vigoria marcata: la piena non ha energia sufficiente per danneggiare le radici e, complice l'aumento della temperatura e della fotosintesi di inizio stagione, l'NDVI cresce anziché diminuire. Situazione intermedia negli intervalli 03 e 05, piene di febbraio e inizio aprile 2024, dove prevale la stabilità (46–65%) con una quota modesta di stress lieve, confermando che eventi di soglia idraulica bassa provocano solo disturbi puntuali.

Interessante l'evoluzione di metà maggio 2024 (intervallo 06): benché l'idrogramma registri un'onda modesta, il mix di suolo ancora umido e colonizzazione di piante effimere produce una distribuzione bimodale, con il 36% in stress lieve (probabilmente legato a erosioni localizzate) ma anche un 20% in vigoria marcata grazie all'aumento di biomassa erbacea ed arborea. Simile risultati si ritrovano anche a fine settembre 2024 (intervallo 07), dove uno stress forte del 19 % si accompagna a oltre metà dei valori in area stabile: la piena incide soprattutto nelle anse fluviali, lasciando intatti i settori a vegetazione consolidata.

Nel quadro complessivo, i valori percentuali confermano che l'ampiezza dell'evento idraulico è il principale fattore d'influenza della risposta NDVI, ma la stagione di accadimento modula la rapidità di recupero: piene tardo-estive sono seguite da una ripresa più lenta a causa della minore capacità di ricrescita imminente, mentre quelle tardo-invernali o primaverili vengono assorbite più rapidamente dall'ecosistema. La sovrapposizione con l'NDWI ha inoltre mostrato che le zone rimaste umide per più giorni coincidono con i pixel che, anche dopo due settimane, persistono in stress lieve o moderato,

suggerendo che l'elevata umidità ed eventuale deposizione di limo fine ritardano la riconquista vegetazionale. Di conseguenza, l'analisi combinata dei due indici consente non solo di quantificare la perdita di biomassa, ma anche di discriminare se l'assenza di recupero è dovuta a fattori idrici (ristagno) o esclusivamente meccanici (asportazione di suolo).

L'ultima parte dell'analisi multispettrale, dedicata alla macro-area di studio, ha indagato il graduale mutamento di suolo ed ecosistema collegandolo alla modulazione climatica stagionale. Per minimizzare l'effetto fenologico è stato adottato l'approccio "finestre stabili": per ogni anno dal 2018 al 2025 sono state selezionate una scena di gennaio, che rappresenta lo stato di quiescenza vegetativa, e una di luglio, al culmine dell'attività fotosintetica. Gli indici NDVI e NDWI delle immagini Sentinel-2 sono stati riclassificati secondo gli intervalli utilizzati precedentemente; le percentuali di superficie occupate da ciascuna classe sono riportate di seguito (Tab. 21, Tab. 22).

NDVI	-1,00–0,015 (%)	0,016–0,14 (%)	0,141–0,18 (%)	0,181–0,27 (%)	0,271–0,36 (%)	0,361–0,74 (%)	0,741–1,00 (%)
gen-18	7,95	11,57	9,93	16,45	11,68	42,38	0,04
gen-19	6,21	18,98	12,66	14,38	20,21	27,56	0,00
gen-20	9,96	20,68	10,44	14,74	20,82	23,34	0,01
gen-21	10,06	15,63	8,96	13,47	11,57	40,19	0,11
gen-22	7,62	5,65	2,33	19,27	9,34	51,76	4,02
gen-23	7,88	3,71	1,57	8,43	15,27	62,21	0,92
gen-24	8,59	12,40	9,10	15,93	10,92	42,92	0,15
gen-25	6,29	7,41	4,16	19,98	13,24	48,78	0,14

Tab. 20. Indici NDVI gennaio 2018-2025

NDWI	-1,0 – -0,20 (%)	-0,20 – 0,00 (%)	0,001 – 0,30 (%)	0,301 – 0,50 (%)	0,501 – 0,70 (%)	0,701 – 1,00 (%)
gen-18	88,77	3,27	1,71	1,46	2,70	2,09
gen-19	86,63	6,88	2,96	2,26	1,27	0,01
gen-20	82,58	7,78	2,72	2,30	4,43	0,20
gen-21	84,39	5,94	2,03	1,22	2,06	4,36
gen-22	88,74	4,56	1,16	0,60	0,54	4,42
gen-23	88,56	3,38	1,98	1,69	3,74	0,64
gen-24	85,84	5,31	2,44	1,64	2,39	2,38
gen-25	86,46	6,30	2,35	1,85	2,22	0,83

Tab. 21. Indici NDWI gennaio 2018-2025

NDVI	-1,00–0,015 (%)	0,016–0,14 (%)	0,141–0,18 (%)	0,181–0,27 (%)	0,271–0,36 (%)	0,361–0,74 (%)	0,741–1,00 (%)
lug-18	5,30	4,80	1,07	2,17	2,32	12,38	71,97
lug-19	6,13	5,19	1,41	3,89	3,68	22,79	56,91
lug-20	6,75	4,96	1,60	2,71	2,41	14,69	66,88
lug-21	8,50	4,68	0,66	2,25	2,61	15,87	65,42
lug-22	3,13	5,11	1,65	3,60	3,44	24,51	58,56
lug-23	2,70	3,03	1,96	4,38	4,33	20,09	63,50
lug-24	6,60	6,68	3,18	6,00	4,60	17,23	55,71

Tab. 22. Indici NDVI luglio 2018-2024

NDWI	-1,0 – -0,20 (%)	-0,20 – 0,00 (%)	0,001 – 0,30 (%)	0,301 – 0,50 (%)	0,501 – 0,70 (%)	0,701 – 1,00 (%)
lug-18	89,00	4,91	2,09	1,34	1,09	1,56
lug-19	88,49	5,05	2,12	1,88	1,56	0,91
lug-20	87,18	5,62	2,14	1,65	1,25	2,15
lug-21	85,88	6,28	1,86	0,92	1,25	3,82
lug-22	89,83	5,34	2,87	1,36	0,59	0,00
lug-23	92,45	3,51	2,11	0,87	0,76	0,31
lug-24	86,35	6,28	2,27	2,36	2,56	0,18

Tab. 23. Indici NDWI luglio 2018-2024

Nei mesi invernali la distribuzione dell'NDVI mostra due comportamenti contrapposti. Fino al 2021 inclusi la classe 0,361–0,740 resta dominante, segno di una copertura arbustiva che mantiene una certa attività fotosintetica pur in stagione fredda; al tempo stesso le classi estreme rimangono residuali, con valori quasi nulli per 0,741–1,00 e percentuali modeste di suolo completamente spoglio. Dal 2022, complice una sequenza di inverni miti, si osserva uno spostamento verso valori più elevati: nel gennaio 2023 la classe 0,361–0,740 sale al 62%, mentre la porzione di suolo nudo (0,016–0,14) scende sotto l'8%. Questa “inverdimento invernale” è coerente con la serie termica delle stazioni di Codroipo e Talmassons, che evidenziano come le temperature medie di gennaio 2023 fossero più alte di 3°C rispetto al gennaio precedente, favorendo la permanenza di coperture erbacee verdi anche in pieno inverno. Sul fronte idrico, l'NDWI invernale resta invece dominato dalla classe più negativa (82-89%), confermando che la macro-area è sostanzialmente asciutta: le piogge invernali non si traducono in ristagni prolungati e l'acqua fluviale è confinata all'alveo. Da notare, però, l'aumento episodico della classe 0,701–1,00 nel gennaio 2021 e 2022 (circa 4 % dell'area), riconducibile a un paio di regimi idrometrici elevati nei giorni del passaggio e dell'acquisizione satellitare.

Nel semestre estivo il quadro spettrale mette in evidenza oscillazioni più complesse, legate alla combinazione fra disponibilità idrica, stress termico e, su scala di bacino, cicli di disturbo–ricolonizzazione innescati dalle piene primaverili. Nel 2018 l'NDVI del greto raggiunge il suo massimo storico recente: quasi il 72% della superficie ricade nella classe di vigoria più elevata (0,741–1,00) mentre solo il 12% occupa il range 0,361–0,740. L'estate seguente (2019) coincide con una prolungata anomalia pluviometrica negativa e temperature sopra media: la quota di vegetazione “molto vigorosa” crolla a 56,9%, sostituita in larga parte da pixel nella fascia 0,361–0,740 che passa al 22,8%. La riduzione di biomassa verde è confermata dalla componente idrica: l'NDWI resta dominato dai valori estremamente negativi (-1 – -0,20), ma la classe secca raggiunge quasi il 88,5%, mentre diminuiscono le classi intermedie legate all'umidità residua.

Nel 2020 un inizio estate più fresco e piogge di giugno favoriscono una parziale crescita della vegetazione; la classe 0,741–1,00 risale al 66,9 % e quella intermedia si contrae dell'8%. L'NDWI riflette tale recupero con un lievissimo aumento dei pixel in 0,701–1,00 (2,15%), indice di probabili ristagni. Tuttavia, l'estate 2021 segna di nuovo un'inversione: pur senza raggiungere l'aridità del 2019, le ondate di calore di giugno-luglio spingono la classe secca del NDWI al 85,9 %, mentre i valori NDVI più alti scendono al 65,4 % a vantaggio del range 0,361–0,740 che torna sopra il 15%.

La stagione critica è il 2022, anno di particolare siccità: NDWI registra la quota più alta di pixel asciutti (quasi 90%) e azzerà quasi del tutto la presenza di acqua libera; la vegetazione reagisce abbassando drasticamente l'NDVI elevato (58,6%) e trasferendo area nella fascia 0,361–0,740 che raggiunge il 25 %, evidenza di stress idrico diffuso. L'effetto persiste nell'estate 2023, quando viene raggiunto il picco assoluto di suoli secchi (92,5% in NDWI) e un nuovo ridimensionamento dell'NDVI vigoroso, mentre avviene una lieve ripresa della biomassa (classe 0,741–1,00 al 63,5%).

La sequenza si chiude con l'estate 2024, sull'onda della piena primaverile di aprile–maggio: i depositi umidi e l'apporto di nutrienti creano una situazione particolare. Da un lato il range di NDWI 0,501–0,700 sale al suo massimo (2,56%) insieme alla fascia 0,301–0,500 (2,36%), indicazione di suoli ancora saturi; dall'altro l'NDVI molto elevato raggiunge il minimo settennale (55,7%). Aumentano quindi sia la frazione di suolo nudo (6,6%) sia il range 0,181–0,360, segno di colonizzazione.

Questa lettura comparata NDVI–NDWI evidenzia come, in assenza di grandi piene fra ottobre 2019 e ottobre 2023, la traiettoria estiva del corridoio fluviale sia stata governata soprattutto dalla disponibilità idrica atmosferica e dall'elevata evapotraspirazione. I dati Sentinel-2 mostrano una perdita netta di vigoria fotosintetica nelle estati più calde e secche, seguita da un parziale recupero dopo l'evento di piena del 2024, quando la combinazione di sedimento e umidità ha innescato un nuovo ciclo di colonizzazione vegetativa. La presenza, nell'ultima estate analizzata, di un leggero ma diffuso aumento di NDWI intermedio suggerisce infine che la ricarica idrica primaverile abbia lasciato un'impronta più persistente di quanto avvenuto negli anni immediatamente precedenti.

5.3. Risultati dell'analisi Sentinel-1

L'elaborazione delle coppie Sentinel-1 IW-SLC (Fig. 34), descritta nel capitolo metodologico, ha fornito per ciascuna piena una maschera dell'allagamento in cui i pixel classificati come acqua corrispondono a valori di retro-diffusione inferiori alla soglia individuata con l'istogramma sulla ROI di riferimento. Importate in ArcGIS Pro, tali maschere sono state riclassificate (valore 1 = acqua, 0 = non-acqua) e il conteggio dei pixel è stato convertito in superficie moltiplicandolo per la dimensione del pixel; in tal modo si è ottenuta la stima dell'estensione inondata per ognuno dei cinque eventi considerati (Tab. 24).

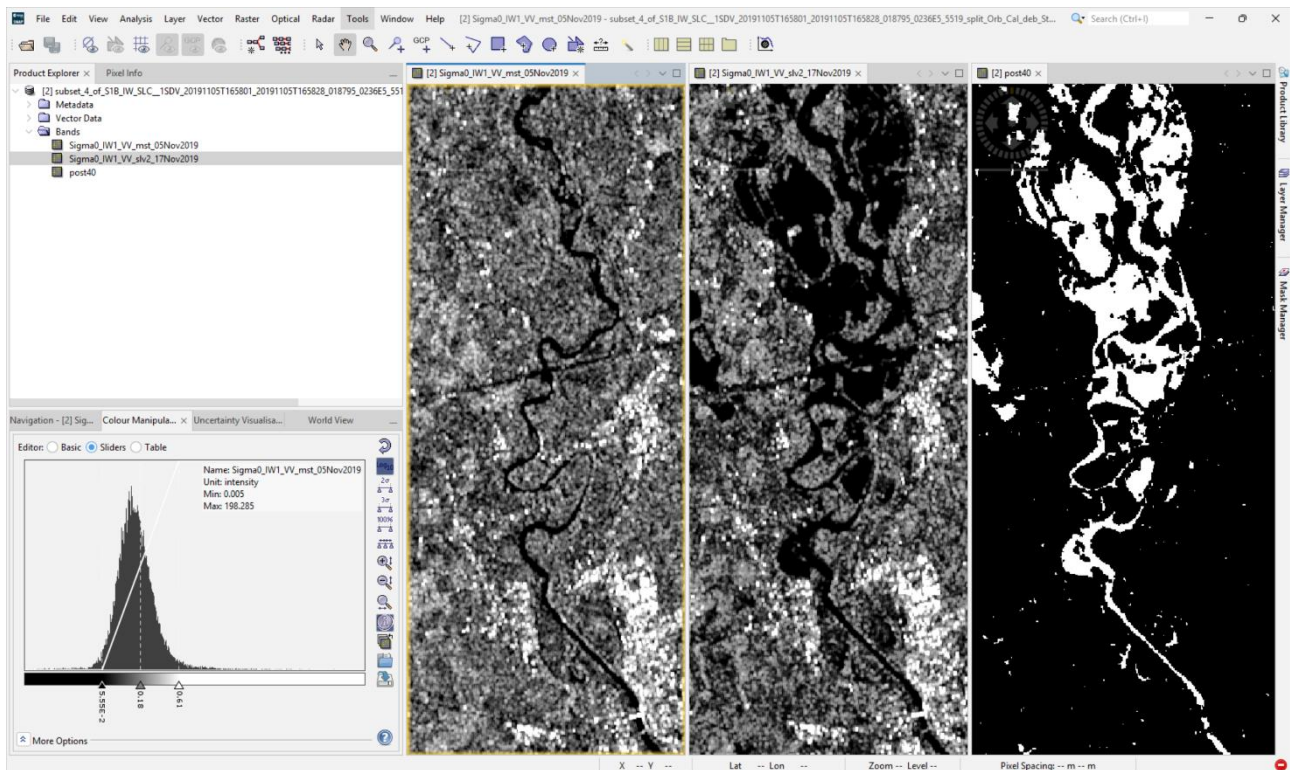


Fig. 34. Evento novembre 2019: elaborazione dei dati radar Sentinel-1

#	Data picco	Superficie area di studio (m ²)	Superficie idrica totale (m ²)	Percentuale superficie idrica su area studio (%)	Superficie idrica in alveo attivo (m ²)	Superficie allagata (m ²)	Percentuale superficie allagata su area studio (%)
1	02/11/2018	5559040	649370	11,681	486890	162480	2,922
2	17/11/2019	5559040	2074590	37,319	647090	1427500	25,678
3	03/11/2023	5559040	777670	13,989	553160	224510	4,038
4	02/04/2024	5559040	-	-	-	-	-
5	17/05/2024	5559040	1080980	19,445	901300	179680	3,232
6	09-11-19/10/2024	5559040	799880	14,388	769160	30720	0,552

Tab. 24. Superfici idriche mascherate

Il 17 novembre 2019 (Fig. 35) rappresenta l'evento più invasivo dell'intera serie: l'acqua copre oltre 207 ha, pari al 37,3% dell'area analizzata. Più di due terzi di questa superficie (142,8 ha) ricade fuori dall'alveo attivo, segno che il colmo, pur parte di un'onda relativamente breve, ha superato la capacità di contenimento delle sponde naturali, propagandosi sulle piane golenali e investendo settori agricoli.

Di contro la piena del 2 novembre 2018 si traduce in una copertura idrica di poco meno di 65ha (11,7% dell'area), con 48,7 ha confinati nell'alveo e appena 16,2 ha di tracimazione.

L'evento del 3 novembre 2023 (Fig. 35) mostra un'estensione intermedia (77,8 ha totali, 22,5 ha di esondazione). Sebbene i colmi registrati superino i livelli di 2° presidio l'allagamento rimane modesto, probabilmente per l'effetto delle modifiche morfologiche degli anni precedenti sull'alveo attivo; il risultato è una mappa di allagamento frammentata, ma concentrata nell'area settentrionale.

Per la piena del 17 maggio 2024 il radar misura 108 ha d'acqua, ma l'esondazione laterale è limitata a 18 ha.

Il caso più modesto è quello di ottobre 2024: tre colmi ravvicinati, ma tutti appena sotto la soglia di secondo presidio, generano 80 ha d'acqua, di cui solo 3 ha oltre l'alveo (0,55% dell'area totale). L'acqua rimane dunque quasi integralmente nell'alveo.

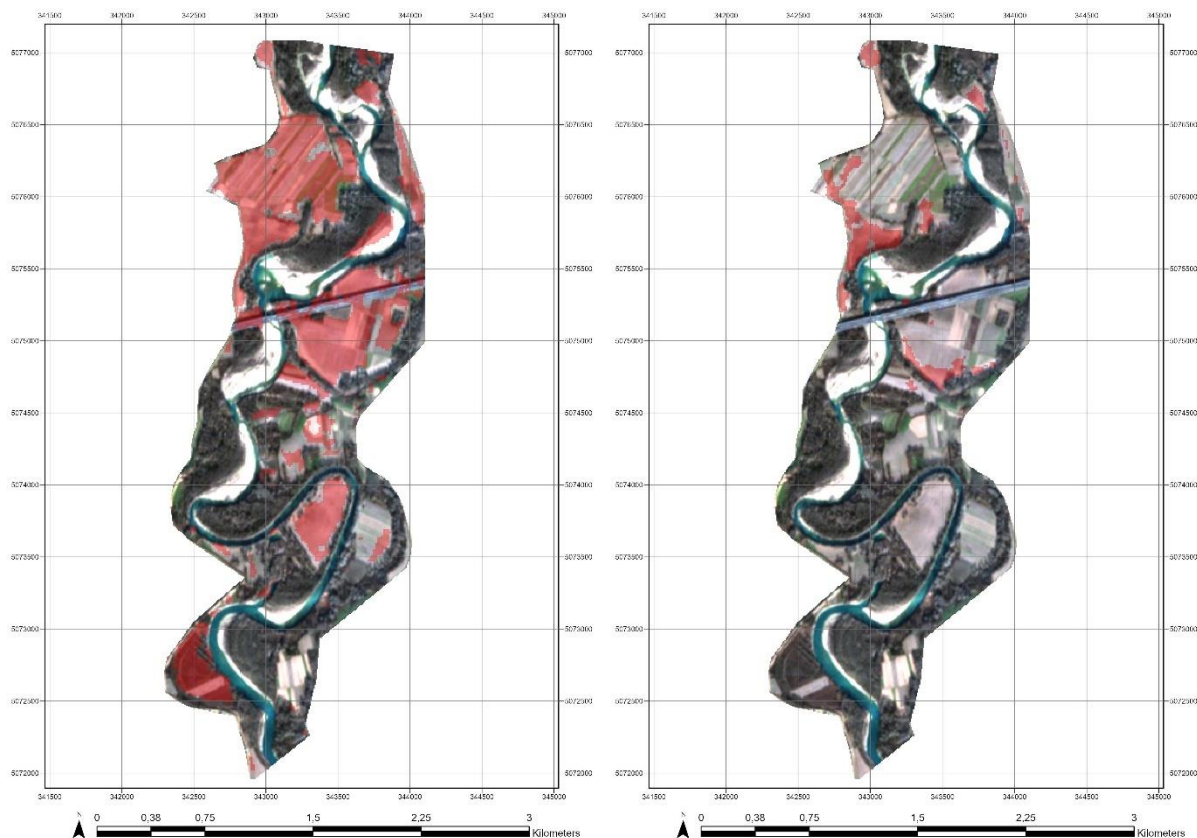


Fig. 35. Aree allagate nell'evento del 2019 e del 2023 evidenziate in rosso

Questi riscontri attestano l'affidabilità della procedura basata sui dati Sentinel-1 nella quantificazione delle superfici sommerse e ne confermano il valore operativo. La metodologia utilizzata, anche con una sola coppia di immagini radar per evento alluvionale, si dimostra efficace nel delineare la distribuzione spaziale e l'estensione delle aree inondate, restituendo risultati coerenti e comparabili con quelli derivati da rilievi diretti sul campo o da fotografie aeree. Tale affidabilità consente non solo di stimare rapidamente e con sicurezza l'ordine di grandezza della superficie interessata dagli eventi di piena, ma anche di identificare chiaramente le aree maggiormente vulnerabili e a rischio. Questa capacità operativa risulta fondamentale per supportare tempestivamente le decisioni legate alla gestione delle emergenze, alla protezione civile e alla pianificazione territoriale, consentendo interventi mirati e strategie preventive efficaci a scala di corridoio fluviale. Inoltre, la possibilità di monitorare costantemente e sistematicamente le aree soggette a fenomeni di allagamento attraverso tecniche satellitari rappresenta un significativo avanzamento nella gestione sostenibile del territorio, garantendo un controllo continuo nel tempo e facilitando la programmazione di interventi di ripristino e mitigazione dei danni ambientali ed economici.

6. Discussione

6.1. Analisi critica dei risultati alla luce della letteratura

I risultati ottenuti evidenziano una notevole variabilità spaziale e temporale nelle dinamiche morfologiche del basso Tagliamento. In particolare, l'analisi delle nuvole di punti fotogrammetriche ha messo in luce la presenza di hot-spot erosivi (settori con arretramenti spondali significativi) alternati ad aree relativamente stabili o con variazioni minime. Questa eterogeneità conferma che il bilancio sedimentario complessivo può mascherare importanti differenze locali e sottolinea la necessità di individuare le zone a maggiore criticità morfologica (es. tratti di sponda in forte arretramento) per una corretta interpretazione dei processi. Dal punto di vista geomorfologico, i dati indicano l'esistenza di processi attivi di migrazione laterale del canale, con traslazioni dell'alveo che testimoniano l'elevata dinamicità del fiume. Tali evidenze sono coerenti con quanto atteso per un corso d'acqua a carattere intrecciato e meandriforme a regime torrentizio ancora relativamente naturale: anche eventi di piena con tempi di ritorno moderati sono in grado di rimodellare sensibilmente l'alveo e le sponde del Tagliamento. Questo risultato concorda con osservazioni su altri fiumi non totalmente regolati, dove si riscontra che le portate ordinarie possono indurre cambiamenti planimetrici apprezzabili, contrariamente ai sistemi fortemente antropizzati in cui solo piene estreme producono alterazioni morfologiche significative [1]. I rilievi confermano quindi che il Tagliamento mantiene dinamiche erosive attive a scala locale, in linea con le traiettorie evidenziate nella letteratura internazionale per fiumi intrecciati semi-naturali.

Un elemento chiave emerso dai risultati è la dissimilitudine nel comportamento erosivo dei diversi siti di monitoraggio (TF01–TF07). Alcuni *test field* hanno mostrato arretramenti spondali marcati tra il 2023 e il 2025, mentre altri hanno subito modifiche più modeste. Questo suggerisce che fattori locali (morfologia delle anse, composizione litologica delle sponde, copertura vegetale, presenza di opere di difesa) controllano la vulnerabilità all'erosione. Ad esempio, i tratti in corrispondenza di anse pronunciate o di sponde elevate prive di copertura arborea sembrano aver sofferto i maggiori crolli, coerentemente con le conoscenze sui processi erosivi in curva dove la combinazione di velocità di flusso e minore coesione del terreno accelera l'arretramento spondale. Studi precedenti confermano che le zone esterne delle anse e le sponde non protette tendono a presentare i tassi di erosione più elevati. Al contrario, porzioni del fiume rettilinee o con vegetazione matura hanno agito da zone “buffer”, resistendo meglio alle sollecitazioni idrauliche delle piene. Questa variabilità interna è in accordo con osservazioni di erosione selettiva in altri bacini: ad esempio, ricerche sul Mekong hanno evidenziato che i tassi di arretramento spondale più elevati si concentrano in alcuni comuni specifici, mentre altrove le sponde restano relativamente stabili [100]. Tali risultati ribadiscono l'importanza di analizzare la distribuzione spaziale dei cambiamenti e non solo i valori medi, così da identificare le aree più critiche su cui focalizzare l'attenzione gestionale.

Dal confronto con la letteratura scientifica emerge che i tassi di erosione laterale misurati sono superiori rispetto a quelli individuati in altri contesti fluviali simili. Duró et al. (2018) hanno misurato con tecnica aerofotogrammetrica arretramenti delle sponde lungo un fiume di media dimensione pari a qualche metro all'anno nei tratti più attivi [5]. Nel presente studio, i massimi arretramenti localizzati sono superiori, nell'ordine di alcune decine di metri in un singolo anno, confermando che il basso Tagliamento presenta dinamiche erosive vigorose analoghe a corsi d'acqua di dimensioni paragonabili. Va tuttavia notato che in contesti di grandi fiumi incanalati la dinamica laterale può essere drasticamente ridotta: ricerche condotte su alcuni fiumi alpini e prealpini hanno documentato una riduzione della mobilità laterale per effetto di opere di regolazione e diminuzione dell'apporto solido. In tale ottica, il comportamento del Tagliamento basso appare intermedio: pur risentendo di interventi antropici (contenimenti in alcuni tratti), conserva una capacità di migrazione e formazione di barre, segno di un compromesso fra stato naturale e influenza antropica. La letteratura evidenzia

come bacini soggetti a moderate pressioni antropiche possano mostrare traiettorie geomorfologiche “ibride”, con *trend* di restringimento dell'alveo ma persistenza di fenomeni erosivi puntuali [2].

Un ulteriore aspetto investigato è la risposta della vegetazione agli eventi di piena, analizzata tramite indici spettrali NDVI e NDWI su ortofoto da aerofotogrammetria da UAV e su immagini Sentinel-2. I risultati multispettrali hanno mostrato una chiara diminuzione dell'NDVI nelle aree soggette ad erosione durante gli eventi di piena, indicativa della perdita di copertura vegetale. Contestualmente, si è osservato un aumento dell'NDWI (indice dell'acqua) in corrispondenza delle superfici inumidite o allagate dalla piena. Queste variazioni spettrali confermano che le piene hanno comportato sia asportazione di biomassa vegetale, sia espansione temporanea dell'area rivestita da acqua libera o suolo umido. Tali evidenze sono coerenti con studi precedenti che documentano come il regime idrologico influenzi marcatamente la dinamica dell'NDVI ripariale, con cali durante periodi di intensa portata per l'allagamento e la rimozione di vegetazione, seguiti da recuperi durante i periodi asciutti [24]. Anche nei tratti oggetto di studio si è riscontrato che i settori dove l'erosione è stata più intensa (evidenziati in rosso nelle mappe di *change detection*) corrispondono a quelli con il calo più marcato di NDVI e, spesso, con segnale NDWI post-evento elevato, a indicare suolo nudo umido o nuova superficie d'acqua. Ciò conferma l'interconnessione tra processi morfologici e dinamica ecologica: la perdita di terreno per erosione implica inevitabilmente la scomparsa della vegetazione riparia presente, aspetto di rilievo per valutare l'impatto ecosistemico delle piene.

Di particolare interesse è stato il confronto multi-scala tra gli indici spettrali derivati dai sensori su UAV e quelli da satellite. Tale analisi ha permesso di valutare in che misura un sensore satellitare a 10 m di risoluzione (Sentinel-2) sia in grado di cogliere i cambiamenti puntuali osservati con dettaglio centimetrico dai sensori montati a bordo del drone. Si è riscontrato che alcune variazioni ben localizzate sono visibili nettamente nelle ortofoto fotogrammetriche (forte calo di NDVI in determinate posizioni), ma risultano attenuate o diluite nella risposta spettrale satellitare a causa dell'effetto di media sul pixel. Questo era atteso, poiché un singolo pixel Sentinel-2 copre 100 m² e può includere un mosaico di superfici diverse (vegetazione residua, acqua, suolo nudo). Ciononostante, i risultati mostrano che i cambiamenti di maggiore entità e continuità spaziale, come l'erosione di segmenti di sponda lunghi decine di metri vengono registrati anche dal satellite, manifestandosi come cluster di pixel a basso NDVI e alto NDWI nelle immagini post-piena. Le immagini satellitari colgono le tendenze generali, ma tendono a sottostimare l'entità massima locale del cambiamento [101]. Dal confronto quantitativo è emerso infatti che gli indici Sentinel-2 presentano variazioni più attenuate (cali di NDVI meno pronunciati) rispetto al riferimento fotogrammetrico. Ciò concorda con quanto riportato in letteratura: ricerche recenti evidenziano che i dati satellitari multispettrali a media risoluzione, pur essendo preziosi per analisi su larga scala, possono avere limitazioni nel rilevare cambiamenti geomorfologici e vegetazionali di piccola scala nei fiumi [8]. L'analisi conferma che, analogamente, anche con Sentinel-2 alcune finzze sfuggono, ribadendo l'utilità di dati ad altissima risoluzione per studi di dettaglio. D'altro canto, l'uso integrato di scale diverse si è rivelato vantaggioso: si è potuto validare e interpretare i dati satellitari sulla base del “*ground truth*” fornita dalla fotogrammetria, comprendendo ad esempio che un calo di NDVI satellitare del 20% corrisponde, nelle condizioni del caso studio, a una perdita quasi totale di copertura arbustiva su scala fine.

In sintesi, la discussione dei risultati evidenzia come l'approccio multiscala e multi-sensore adottato, unendo fotogrammetria da UAV, indici multispettrali e dati satellitari, offra una visione più completa delle dinamiche fluviali recenti. La fotogrammetria da drone, grazie alla risoluzione centimetrica, ha permesso di misurare con precisione centimetrica le variazioni topografiche e quindi di quantificare volumi erosi anche molto ridotti, superando i limiti dei rilievi tradizionali e delle immagini satellitari a media risoluzione. Contestualmente, l'analisi spettrale ha fornito indicazioni sullo stato della vegetazione e sull'estensione delle acque superficiali. I risultati mostrano come l'unione di tecniche geomatiche consenta di ottenere una lettura dettagliata dell'evoluzione morfologica recente, costituendo una base quantitativa solida per interpretazioni interdisciplinari (collegamenti tra dinamica fisica, risposta ecologica e gestione territoriale e degli eventi). Si tratta di

un contributo rilevante in quanto, pur esistendo numerosi studi separati su analisi topografiche da UAV e su indici spettrali, sono ancora poche le applicazioni integrate che combinano queste fonti per un piccolo bacino fluviale meandriforme.

Dal punto di vista critico, è importante riconoscere i limiti e le possibili fonti di incertezza dei risultati. Anzitutto, l'accuratezza delle stime di variazione morfologica dipende strettamente dalla qualità del dato fotogrammetrico. Nel *workflow* adottato, è stata adottata la tecnica della georeferenziazione diretta, la quale è stata validata dall'impiego di alcuni punti di controllo a terra. La precisione ha consentito di applicare correttamente una soglia di rilevabilità (LoD95) sui volumi differenziali. In tutti i confronti temporali effettuati, il volume minimo rilevabile è risultato inferiore al volume effettivamente calcolato come differenza, il che significa che i cambiamenti individuati superano il rumore di fondo ed è quindi altamente probabile che siano reali. Ciò non toglie che piccole variazioni prossime alla soglia (specie in aree di difficile ricostruzione come sotto vegetazione molto fitta) possano contenere un margine di incertezza: è presumibile che piccoli crolli sotto copertura arborea densa potrebbero non essere stati rilevati oppure essere stati confusi con errori di modellazione del terreno. Inoltre, il confronto tra nuvole di punti ottenute in stagioni diverse può risentire di differenze nelle condizioni vegetative, di coltura e di umidità del suolo: nel caso studio si è cercato di effettuare i voli in condizioni idrauliche simili per minimizzare l'effetto del diverso livello idrometrico sulla morfologia esposta, tuttavia non è escluso che variazioni residue di contenuto d'acqua nel sedimento abbiano alterato leggermente la riflettanza o la compattezza del terreno, influenzando localmente la ricostruzione. L'uso di indici NDWI ha aiutato a distinguere le variazioni legate all'acqua durante le analisi, ma questa resta una considerazione valida per futuri sviluppi.

Un altro limite significativo è legato alla copertura vegetale: le aree fortemente boscate lungo le sponde rappresentano una sfida per la fotogrammetria e per la *detection* dei cambiamenti. Nelle zone dove la vegetazione permane densa, la visibilità del suolo nelle ortofoto UAV è limitata, e quindi l'algoritmo SfM potrebbe restituire la superficie della chioma anziché quella del terreno. Ciò implica che eventuali erosioni sotto copertura arborea fitta potrebbero passare inosservate finché la vegetazione non viene rimossa naturalmente o artificialmente. Nel periodo di acquisizione fotogrammetrica, alcune sponde boscate hanno effettivamente visto caduta di alberi in seguito all'erosione basale, e tali cambiamenti sono stati rilevati attraverso il calo di NDVI e la comparsa di segnali di suolo nudo; tuttavia, viene riconosciuto che piccoli arretramenti senza perdita immediata di vegetazione potrebbero non essere stati identificati. In ottica critica, ciò suggerisce che un monitoraggio ideale dovrebbe includere tecniche in grado di "vedere sotto" la vegetazione, come il LiDAR da UAV a più echi, che consente di penetrare la copertura fogliare e ottenere modelli del terreno anche in presenza di boschi ripari mediamente densi. Pur non avendo avuto la possibilità di impiegare il LiDAR in questo studio, la letteratura ne evidenzia il potenziale integrativo per mappare la morfologia del suolo nascosta dalla vegetazione. Pertanto, uno dei limiti attuali del presente lavoro potrebbe essere superato in futuro con l'utilizzo di sensori LiDAR a bordo drone, se disponibili.

Infine, occorre menzionare il campo di validità temporale e spaziale dei risultati. Il monitoraggio è stato condotto su un periodo relativamente breve (2023-2025) e su porzioni selezionate dell'area fluviale (TF03, TF05 e TF07 sono i tre siti più rappresentativi). Sebbene ciò abbia permesso una risoluzione fine e una frequenza di osservazione elevata su questi siti, resta aperta la questione dell'estensione e della durata: per estrapolare i risultati all'intero basso Tagliamento e al comportamento di lungo termine, servirebbero dati su un arco pluridecennale e un maggior numero di sezioni. I risultati rappresentano dunque una fotografia dettagliata dell'evoluzione recente in aree campione, ma non necessariamente catturano tutte le possibili dinamiche del fiume. Inoltre, varie contingenze hanno comportato lo svolgimento di campagne di rilievo in stagioni differenti, il che potrebbe introdurre effetti stagionali nelle immagini (diversa fenologia della vegetazione) non eliminabili nel confronto. In letteratura si suggerisce di effettuare, ove possibile, confronti stagione-su-stagione per isolare meglio gli effetti degli eventi di piena dal rumore stagionale [24]. Nel triennio questo accorgimento non è stato pienamente fattibile, ma è da tenere presente in futuri studi.

6.2. Utilità operativa delle tecniche geomatiche per il monitoraggio dei bacini minori

I risultati discussi sopra mettono in evidenza l'elevato valore aggiunto che le moderne tecniche geomatiche, in particolare la fotogrammetria da UAV con antenna GNSS nRTK e l'analisi di immagini multispettrali, apportano nel monitoraggio dei corsi d'acqua di piccole e medie dimensioni. Tradizionalmente, il controllo morfologico dei bacini minori era limitato da difficoltà logistiche ed economiche: i rilievi topografici a terra o con strumentazione terrestre (stazioni totali, GNSS) risultavano troppo onerosi da ripetere su vasta scala e con alta frequenza, mentre i dati telerilevati a disposizione (fotografie aeree o satellitari a risoluzione moderata) spesso non avevano il dettaglio necessario per cogliere i mutamenti di una stretta fascia riparia. In questo contesto, l'impiego di droni equipaggiati con sensori avanzati rappresenta una soluzione efficace, consentendo di colmare il vuoto informativo tra scala di dettaglio e scala areale. Gli UAV offrono infatti la possibilità di effettuare rilievi aerofotogrammetrici ad altissima risoluzione spaziale (centimetrica) in modo flessibile e relativamente economico, aprendo prospettive di monitoraggio prima impensabili per enti locali e gestori di servizi. Come evidenziato da Liao et al. (2018), i sensori trasportati da UAV in molti casi superano i sensori satellitari e aerei tradizionali nel telerilevamento a livello locale, grazie alla loro maggiore risoluzione, intelligenza a bordo, mobilità e flessibilità operativa [6]. Nel contesto del Tagliamento, queste caratteristiche hanno permesso di acquisire in pochi giorni di campagna dati dettagliati su settori fluviali distribuiti lungo chilometri, con costi molto contenuti rispetto a campagne aeree o rilievi LiDAR. Ciò indica chiaramente l'elevata utilità operativa di tali tecniche: un singolo operatore, dotato di un drone e del *know-how* fotogrammetrico, può monitorare l'evoluzione di numerosi tratti spondali a rischio, fornendo ai gestori un flusso di informazioni aggiornato quasi in tempo reale.

Un vantaggio cardine delle tecniche geomatiche moderne è la loro capacità di coniugare accuratezza e alta risoluzione spaziale con una copertura sufficientemente ampia. Questo studio, pur concentrandosi su aree test relativamente limitate (dell'ordine di qualche centinaio di metri di lunghezza ciascuna), dimostra che è possibile ottenere modelli 3D e ortofoto con errore sub-decimetrico in coordinate assolute, mantenendo una densità di punti e pixel tali da rilevare dettagli minuti. Questa capacità di rilevare sia i fenomeni diffusi sia quelli puntuali e di piccola scala è fondamentale per il monitoraggio di corsi d'acqua minori, dove spesso i cambiamenti critici (come l'innescò di un processo erosivo locale) possono avere dimensioni ridotte, ma implicazioni significative se trascurati. Ad esempio, un arretramento localizzato di 1–2 m su una sponda argillosa può preludere a un cedimento più esteso e rapido in caso di piena successiva; le tecniche tradizionali a minor risoluzione potrebbero non accorgersi di questo segnale precoce, mentre un rilievo fotogrammetrico da UAV lo documenta chiaramente. Il metodo consente inoltre di quantificare in modo attendibile i volumi coinvolti nei processi erosivi, informazione cruciale per bilanci sedimentari. Studi recenti hanno evidenziato come la fotogrammetria da UAV possieda un livello di accuratezza paragonabile a rilievi LiDAR nel ricostruire superfici fluviali, con l'ulteriore vantaggio di fornire una copertura completa in aree scoperte e restituzioni fotorealistiche utili anche alla comunicazione e interpretazione visiva dei fenomeni. In aggiunta, metodi avanzati di confronto 3D (come M3C2 o C2C) applicati alle nuvole di punti permettono di mappare le variazioni in modo continuo, superando la tradizionale limitazione delle analisi puntuali su sezioni trasversali. Questo approccio è individuabile anche in letteratura proprio per migliorare il monitoraggio fluviale: Woodget et al. (2017) parlano di passaggio "*from classifications to continuums*" per descrivere il valore di avere rappresentazioni spazialmente continue del letto e delle sponde, in luogo di categorizzazioni discrete limitate a tratti isolati [7]. Nello studio effettuato, le analisi hanno evidenziato chiaramente la distribuzione spaziale dell'erosione all'interno di ciascun test field, rendendo immediata l'individuazione dei settori più attivi attraverso le mappe a falsi colori C2C (Fig. 29, citata nei risultati).

Un ulteriore aspetto dell'utilità operativa risiede nella rapidità di intervento ed elaborazione. I droni moderni possono essere dispiegati con breve preavviso, permettendo di effettuare rilievi immediatamente dopo un evento di piena (non appena le condizioni di sicurezza lo consentono) e di ottenere ortofoto e modelli 3D nel giro di poche ore o giorni grazie a software di SfM sempre più automatizzati e potenti. Ciò è fondamentale per la gestione operativa, perché consente di individuare prontamente criticità e potenziali situazioni di rischio (ad esempio una sponda che si è molto indebolita e potrebbe cedere ulteriormente alla piena successiva) e pianificare interventi mitigativi in tempi utili. Nella letteratura sul monitoraggio fluviale si sottolinea sempre più il concetto di “*near-real-time monitoring*” per la gestione adattiva: grazie ai sensori su UAV, questo sta diventando raggiungibile anche per piccoli corsi d'acqua, colmando un divario rispetto ai grandi fiumi dove magari esistono reti di sensori o monitoraggi istituzionali.

Oltre alla rapidità, va evidenziato il basso costo comparativo di queste tecniche rispetto ai metodi tradizionali. Una volta sostenuto l'investimento iniziale per l'acquisto del drone e delle licenze software, le campagne di volo presentano costi marginali ridotti. In questa ricerca, ogni rilievo di un *test field* (circa 6-12 ha) è stato completato in poche ore da un singolo operatore, senza necessità di strumentazione aggiuntiva eccetto i target a terra utilizzati come punti di controllo. Questo implica che anche con budget modesti è possibile implementare un programma di monitoraggio annuale o semestrale di vari siti. In confronto, tecniche classiche come i rilievi topografici con ricevitori GNSS richiederebbero molte più giornate-uomo per coprire la stessa area con dettaglio inferiore, mentre un volo LiDAR aereo o satellitare ad alta risoluzione ha costi elevati e tipicamente non è giustificato per piccoli tratti fluviali. La democratizzazione del monitoraggio grazie ai sensori su UAV è un punto sottolineato anche da Smith e Vericat (2015) e altri autori, che rimarkano come la fotogrammetria da drone stia rendendo accessibili analisi 3D di alta qualità a una platea molto più ampia di utilizzatori (università, agenzie locali, professionisti) rispetto al passato in cui erano appannaggio di enti nazionali con risorse ingenti [28]. Questo cambio di paradigma è particolarmente significativo per i bacini minori, spesso trascurati nei programmi di monitoraggio ufficiali focalizzati sui grandi fiumi: tecnologie *low-cost* e *user-friendly* permettono di colmare in parte questa lacuna, fornendo dati quantitativi anche su torrenti e piccoli fiumi di interesse locale.

Un aspetto operativo da considerare è la scalabilità e ripetibilità del metodo. L'esperienza sul Tagliamento suggerisce che le tecniche geomatiche possono essere adattate a diversi contesti di bacini minori, purché si tenga conto di alcune considerazioni:

1. condizioni meteo e stagionali: i rilievi da UAV richiedono finestre di tempo stabile e luminosità adeguata; nei periodi invernali o in aree montane possono esserci limitazioni (vento, neve, ecc.) che richiedono pianificazione flessibile;
2. regolamentazione dello spazio aereo: in Italia l'utilizzo di UAV che trasportano sensori audiovisivi richiede un'abilitazione ed eventuali autorizzazioni se si opera vicino a infrastrutture sensibili; tuttavia, per bacini minori spesso ci si trova in zone rurali dove la burocrazia è ridotta e i voli possono avvenire in categoria *open* o *specific* con procedure semplificate;
3. formazione: sebbene la fotogrammetria digitale abbia semplificato molto le elaborazioni, è necessario disporre di operatori qualificati sia per il pilotaggio in sicurezza dei droni, sia per l'elaborazione successiva; questo implica investire in formazione.

Complessivamente, la replicabilità è elevata: una volta definito un protocollo (come quello descritto in capitoli precedenti, con linee guida su altitudini di volo, overlap fotografico, posizionamento CP, ecc.), esso può essere applicato ad altre aste fluviali minori con minimi adattamenti. In letteratura iniziano a comparire esempi di successo in tal senso: Casado et al. (2015) hanno sviluppato una metodologia automatizzata per identificare elementi idromorfologici (barre, canali, sponde erose) da ortofoto UAV ad alta risoluzione, applicandola in diversi casi studio con ottimi risultati nel riconoscimento delle forme fluviali [21]. Ciò dimostra che linee procedurali

standard basate su rilievi UAV possono essere trasferite e adottate su scala regionale per il controllo dello stato morfologico dei corsi d'acqua minori.

Da tutti questi elementi si evince come le tecniche geomatiche avanzate costituiscano ormai un supporto imprescindibile per il monitoraggio fluviale operativo. Esse permettono di soddisfare contemporaneamente diverse esigenze dei gestori: la necessità di dettaglio (ad esempio per valutare la stabilità di una singola sponda in relazione a un'opera adiacente), la necessità di copertura (monitorare più siti lungo tutto il bacino), la frequenza di aggiornamento (avere dati dopo ogni evento significativo) e l'economicità. Un ulteriore beneficio indiretto è la mole di dati storici che si può accumulare: archiviando le ortofoto e i modelli digitali generati ad ogni rilievo, si costruisce una banca dati temporale che diventa essa stessa informazione preziosa per analisi retrospettive. Ad esempio, se fra 10 anni si osserverà un cambiamento importante, si potrà confrontare con le ortofoto del 2023-25 qui prodotte per capire esattamente cosa è mutato. In passato, molti bacini minori erano privi di qualunque documentazione storica dettagliata; con questi strumenti, anche un piccolo tratto di un fiume minore può avere il suo "registro" evolutivo. Questo aspetto assume rilievo nella prospettiva di lungo termine della gestione adattativa ai cambiamenti climatici: sapere come e dove si sono registrati dei cambiamenti nel tempo consente di anticipare possibili tendenze future e predisporre piani di intervento proporzionati. In definitiva, la discussione conferma le indicazioni presenti nella comunità scientifica internazionale: le tecniche geomatiche ad alta risoluzione non sono più da intendersi solo come strumenti di ricerca, ma stanno divenendo strumenti operativi, da integrare nei protocolli di monitoraggio correnti per una gestione più informata e proattiva dei corsi d'acqua.

6.3. Estensioni possibili

Nel delineare le prospettive future del monitoraggio geomatico fluviale emergono numerose estensioni tecnologiche potenzialmente in grado di migliorare ulteriormente i risultati ottenuti e di rispondere a domande di ricerca e di gestione più avanzate. Tra queste, spiccano l'utilizzo di sensori iperspettrali e termici a bordo di droni, nonché l'adozione di tecniche di ML (*Machine Learning*) e AI (Intelligenza Artificiale) per automatizzare l'analisi dei dati. Di seguito si riporta come ciascuna di queste estensioni potrebbe contribuire ad ampliare le capacità del sistema di monitoraggio:

- **sensori iperspettrali:** l'impiego di camere iperspettrali su piattaforma UAV consentirebbe di acquisire informazioni in un maggior numero di bande spettrali, rispetto alle sole quattro bande del sensore multispettrale utilizzato in questo studio. Ciò aprirebbe prospettive del tutto nuove per l'analisi della vegetazione e dei sedimenti fluviali. In ambito vegetazionale, i dati iperspettrali permettono ad esempio di distinguere le specie e lo stato di salute della copertura riparia con grande precisione, grazie alla caratterizzazione fine delle firme spettrali di ciascuna specie (*feature* che con NDVI a banda larga possono confondersi). Studi internazionali hanno già dimostrato il potenziale in tal senso: Michez et al. (2016), hanno effettuato classificazioni di specie forestali riparie e valutazioni del loro stato di salute utilizzando dati multi-temporali, evidenziando un'elevata accuratezza nel riconoscere specie diverse e sintomi di stress vegetativo [25]. Applicando simili approcci al nostro caso, sarebbe possibile mappare la composizione specifica della vegetazione del Tagliamento e monitorarne l'evoluzione in risposta alle piene, individuando ad esempio se certe specie pioniere colonizzano rapidamente le aree di nuova deposizione oppure se specie invasive attecchiscono nelle zone disturbate. Inoltre, le analisi iperspettrali consentono di rilevare indici di vegetazione più sofisticati, offrendo indicazioni sul vigore e lo stress della vegetazione riparia non ottenibili con il solo NDVI. Ciò potrebbe segnalare precocemente fenomeni di disseccamento o stress idrico della vegetazione lungo le sponde, fornendo un ulteriore parametro per valutare la stabilità delle rive (una vegetazione riparia in stress può preludere a perdita di coesione radicale e maggior suscettibilità all'erosione). Anche riguardo ai sedimenti e alla qualità dell'acqua, i sensori iperspettrali potrebbero dare un contributo, discriminando con maggiore dettaglio le caratteristiche del materiale di alveo;
- **fotogrammetria termica:** un'altra estensione promettente consiste nell'abbinare al rilievo fotogrammetrico classico riprese termografiche nell'infrarosso termico (banda $\sim 7\text{--}15\mu\text{m}$). Le camere termiche trasportate da UAV sono ormai disponibili in formati compatti e, sebbene abbiano risoluzioni spaziali inferiori alle camere RGB, possono fornire mappe di temperatura superficiale dell'area studiata. In ambito fluviale, le applicazioni della termografia sono diverse. Una primaria utilità è la mappatura della presenza di acqua e umidità: l'acqua, avendo una risposta termica diversa rispetto al terreno circostante, può essere individuata anche in condizioni in cui la distinzione visiva è difficoltosa (ad esempio sotto copertura vegetale bassa, in ombra o di notte). Recenti studi hanno sviluppato metodi innovativi per rilevare la rete idrica di piccoli bacini usando proprio immagini termiche da drone combinate con foto RGB. Nel contesto del Tagliamento, ciò significherebbe ad esempio poter individuare con precisione le aree ancora umide dopo una piena oppure tracciare piccoli flussi d'acqua che si insinuano tra le barre, difficili da vedere nelle ortofoto, ma ben distinguibili in termografia se l'acqua è più fredda o più calda del substrato [102]. Un altro impiego rilevante è legato al “*groundwater upwelling*”: zone di risorgiva o di ingresso di acque di falda nel fiume spesso si manifestano con anomalie termiche (acqua più fresca d'estate o più calda d'inverno rispetto all'acqua di superficie). Mappare queste zone con una camera termica aiuterebbe a identificare tratti di corrente preferenziale sotterranea e potenziali aree di debolezza (le risorgive alla base delle sponde possono favorire crolli per instabilizzazione). Inoltre, la termografia può essere sfruttata per valutare lo stress idrico della vegetazione: piante in carenza d'acqua tendono ad

avere temperature fogliari più alte per ridotta evapotraspirazione, segnale che una camera termica può cogliere su larga scala. Integrare mappe termiche e multispettrali potrebbe dunque fornire un quadro più completo dello stato fisiologico del bosco ripario e della sua interazione con l'acqua. Dal punto di vista metodologico, l'uso di immagini termiche da UAV presenta ancora delle sfide (la calibrazione radiometrica, l'influenza della variabilità diurne, la risoluzione spesso limitata), ma i progressi sono rapidi;

- tecniche di ML per l'automazione: l'enorme mole di dati prodotta dai rilievi aerofotogrammetrici e satellitari pone la sfida di estrarre informazione in modo efficiente e possibilmente automatico. L'adozione di algoritmi di ML e di AI può contribuire in almeno due ambiti: la classificazione e segmentazione automatica delle immagini e delle nuvole di punti, e l'individuazione automatica dei cambiamenti e degli elementi di interesse. Nel primo caso, invece di affidarsi solo ad indici spettrali o al lavoro manuale dell'operatore per classificare superfici (acqua, vegetazione, suolo nudo, ghiaia) o riconoscere forme (canali, barre, frane di sponda), si possono addestrare modelli di apprendimento automatico (supervisionato o non supervisionato) a riconoscere elementi nei dati. Ancora più interessante è il secondo ambito, quello della *change detection* automatica tramite AI: attualmente si sono individuati i cambiamenti confrontando visivamente mappe o differenze di indici, ma sistemi di deep learning potrebbero essere addestrati a confrontare due epoche di dati e a restituire direttamente le zone di cambiamento significativo. Un ulteriore passo in questa direzione è l'utilizzo di AI per prevedere i cambiamenti: modelli di ML opportunamente alimentati con serie temporali di dati fluviali potrebbero effettuare analisi predittive, ad esempio stimando la probabilità di arretramento di una certa sponda dato lo stato attuale e scenari di piena futuri. Sebbene ciò vada oltre la portata del lavoro corrente, i *trend* della ricerca indicano un crescente interesse verso strumenti predittivi basati su AI per la geomorfologia fluviale, in particolare in ottica di mitigazione dei rischi. Va peraltro riconosciuto che l'introduzione di ML ed AI nel workflow comporta delle sfide. Innanzitutto, la necessità di disporre di dataset di addestramento adeguati: servono molte immagini o casi documentati di erosione per addestrare un modello robusto. La banca dati di questa ricerca potrebbe non essere sufficiente da sola, ma integrandola con altri studi simili si potrebbe alimentare un modello generico. Inoltre, i modelli di AI sono talvolta percepiti come "scatole nere" e i gestori potrebbero diffidare di output non interpretabili; per questo è importante mantenere comunque un controllo da parte della componente umana e usare l'AI come supporto.

In sintesi, le possibili estensioni tecnologiche presentate rappresentano direzioni complementari e sinergiche per migliorare il monitoraggio fluviale. I sensori iperspettrali fornirebbero informazioni spettrali supplementari, la termografia aggiungerebbe una dimensione fisica ulteriore legata al calore e all'umidità, mentre l'AI garantirebbe una capacità elaborativa per trarre il massimo significato dai big data raccolti, sgravando l'operatore da compiti ripetitivi. Già oggi sono in corso progetti sperimentali che integrano alcune di queste componenti; ad esempio, Rynkiewicz. et al. (2025) hanno combinato immagini Sentinel-2 e algoritmi di *Random Forest* per quantificare automaticamente le perdite di vegetazione in aree alluvionate, dimostrando l'efficacia di queste metodologie [38]. È presumibile che tali approcci diventino sempre più comuni e accessibili. Per i bacini minori, in particolare, essi potrebbero significare la possibilità di implementare sistemi di sorveglianza fluviale intelligenti: UAV multi-sensore utilizzati dopo ogni piena, dati caricati su cloud e analizzati da AI, e infine segnalazioni inviate ai decisori in caso di anomalie (erosioni critiche, cambiamenti repentini). Questa integrazione costituirebbe un progresso verso la gestione adattiva digitale dei corsi d'acqua, in cui le informazioni fluiscono rapidamente dai sensori alle decisioni.

6.4. Linee guida per un sistema di monitoraggio UAV-satellite

Sulla base dei risultati ottenuti, è possibile delineare alcune linee guida operative per implementare un sistema di monitoraggio integrato UAV-satellite del basso Tagliamento, o di altri bacini fluviali minori, che sia efficace ed economicamente sostenibile. L'obiettivo di tali linee guida è fornire ai gestori (es. enti di bonifica, autorità di bacino, protezione civile locale) uno schema pratico per sorvegliare l'evoluzione morfologica e vegetazionale del corso d'acqua, combinando le due fonti di dati: i sensori dei droni, ad alta risoluzione e utilizzabili su richiesta quando necessari, e i dati satellitari, a copertura continua nel tempo e nello spazio, ma a risoluzione inferiore. Di seguito vengono proposti i punti chiave di questo sistema integrato:

1. definizione delle aree e frequenza di monitoraggio: occorre identificare i tratti critici del fiume da monitorare tramite sensori da UAV. Questi possono essere selezionati sulla base delle conoscenze pregresse (punti noti per fenomeni erosivi, segnalazioni storiche) utilizzando i dati satellitari esistenti, analizzando immagini Sentinel-2 degli ultimi 5-10 anni per individuare zone di evidente mobilità planimetrica o variazioni di vegetazione anomale. Le aree così individuate costituiranno i “*test field*” per i rilievi da UAV periodici. Per ciascuna area, si stabilisce una frequenza di rilievo in funzione della dinamica attesa: tipicamente, si suggerisce un rilievo fotogrammetrico da UAV all'anno in condizioni di magra per avere un aggiornamento generale e rilievi aggiuntivi immediatamente post-piena in caso di eventi significativi. Questa cadenza permette di acquisire dati subito dopo gli eventi dannosi, ma anche di avere un archivio annuale regolare. Sul fronte satellitare, si sfrutteranno appieno le acquisizioni di Sentinel-2 e Sentinel-1 per monitorare l'intero alveo del Tagliamento. In particolare, si potrà impostare un sistema in cui le immagini Sentinel-2 vengano analizzate mensilmente per derivare indici di vegetazione e di umidità (NDVI, NDWI) lungo il fiume, così da rilevare eventuali *trend* o variazioni improvvise che possano indicare erosioni o depositi importanti. Analogamente, Sentinel-1 potrebbe essere utilizzato in occasione delle piene per mappare estensioni delle inondazioni, processando in automatico le immagini acquisite durante e dopo un evento. Questi rilevamenti satellitari costanti fungono da sistema di allerta: se i satelliti indicano un cambiamento notevole in un'area non prevista, si può pianificare un rilievo da UAV mirato aggiuntivo su quell'area. In sostanza, i sensori su UAV coprono i siti noti con alta frequenza, mentre i satelliti sorvegliano l'intero bacino segnalando dove accadono macro-eventi;
2. strumentazione e risorse umane: per l'implementazione a basso costo, la scelta del drone e dei sensori è cruciale. Si può optare per un UAV multirottore di classe leggera (< 2 kg) dotato di camere RGB e multispettrali e antenna GNSS nRTK come quello adottato nel presente studio. Come personale, è sufficiente un team (2–3 persone): un pilota di APR certificato e uno/due operatori di supporto. Tali figure potrebbero far parte dell'ente stesso (formando personale interno, opzione sostenibile sul lungo periodo) oppure essere fornite da collaborazioni con università/enti di ricerca. È opportuno predisporre all'inizio un protocollo operativo standardizzato per i rilievi che includa, altezza di volo, *overlap* trasversale e longitudinale, schema di volo, numerosità dei punti di controllo, ecc. Parallelamente, va definito un flusso di elaborazione: utilizzo di software (commerciali come Metashape o Pix4D, o open source) per la generazione di nuvole di punti, DSM ed ortofoto, e procedure in ambiente GIS per il calcolo semi-automatico degli indici NDVI/NDWI e delle differenze altimetriche. Idealmente, parti di questo flusso possono essere automatizzate con script (usando batch processing in Metashape e strumenti Python in GIS) per ridurre il tempo di lavoro manuale;
3. integrazione con piattaforme satellitari e open data: un sistema a basso costo deve sfruttare il più possibile i dati gratuiti disponibili. In tal senso, la piattaforma GEE può essere preziosa per automatizzare l'analisi delle immagini Sentinel. Si potrebbe sviluppare un *workflow* in cui per ogni nuovo set di immagini viene aggiornata la mappa degli indici lungo il fiume, evidenziando con codici colore le variazioni rispetto alla situazione precedente. Un simile approccio potrebbe

essere implementato per il Tagliamento, focalizzato però sul breve termine e integrato con i dati acquisiti. Si può pensare a un sistema in cui i dati da sensori UAV vengono archiviati in un geodatabase locale, ma con estratti (ortofoto ridotte, shapefile di aree erose) pubblicabili in ambiente GIS; i dati Sentinel e altre informazioni (es. sensori idrometrici e di portata) potrebbero essere visualizzabili tramite un'interfaccia web GIS *open-source*. In questo modo, con un semplice browser, il decisore può vedere una panoramica dello stato attuale: immagini satellitari a 10 m aggiornate periodicamente e, in sovrapposizione, gli elaborati dei sensori da UAV dell'ultimo volo disponibile per ogni sito;

4. procedure di allerta e intervento: definito il sistema di raccolta dati, occorre stabilire come questi guideranno concretamente le azioni di gestione. È opportuno formalizzare delle soglie di allarme basate su parametri misurati che dovrebbero essere concordate con gli *stakeholder* (comuni, uffici tecnici) e integrate nei piani di emergenza. Il vantaggio di avere un monitoraggio strumentale è la possibilità di disporre di criteri quantitativi per decidere, anziché basarsi solo su ispezioni visive episodiche;
5. coinvolgimento della comunità e open data: un sistema di monitoraggio a basso costo può trarre beneficio anche dal coinvolgimento di soggetti esterni. Ad esempio, programmi di “*citizen science*” potrebbero integrare le osservazioni strumentali: residenti locali o associazioni minori potrebbero segnalare via app o portale eventuali cambiamenti notati (un nuovo tratto di sponda crollato, un albero caduto in alveo) che il sistema strumentale potrebbe non cogliere immediatamente se avviene fuori dai siti target. Queste segnalazioni potrebbero innescare rilievi da UAV mirati fuori programma. Inoltre, rendere disponibili i dati raccolti (pubblicando periodicamente le ortofoto da UAV e le mappe di erosione in formato open data) aumenta la trasparenza e consente ad altri ricercatori o enti di riutilizzarli per studi comparativi o per raffinare i modelli di rischio. Ad esempio, i dati del presente progetto potrebbero essere utilizzati dai ricercatori per calibrare modelli idraulici 2D delle piene, confrontando le zone effettivamente erose con quelle a maggior velocità simulata. Questo genere di sinergie tra monitoraggio e ricerca aumenta il valore complessivo del sistema.

Seguendo queste linee guida, un ente territoriale potrebbe implementare in modo relativamente rapido un sistema di monitoraggio che unisce i vantaggi del telerilevamento satellitare (copertura sinottica, continuità temporale, costo nullo dei dati) con quelli del rilievo da UAV (risoluzione elevata e flessibilità di acquisizione). Sistemi di questo tipo definiscono il concetto di “monitoraggio multiscala integrato”, che è sempre più promosso nella gestione ambientale moderna. Nel caso studio, se questo sistema fosse adottato stabilmente, i gestori del Tagliamento disporrebbero di un flusso costante di informazioni: mappe annuali delle variazioni morfologiche dettagliate nei punti chiave, mappe mensili dello stato della vegetazione e delle acque lungo tutto il fiume, e *alert* automatici in caso di eventi critici.

In prospettiva, queste linee guida potrebbero essere estese ad altri bacini minori del territorio regionale: l'implementazione su un caso pilota come il Tagliamento fornirebbe un modello replicabile per la creazione di una rete di monitoraggio diffusa su più torrenti e fiumi di medio corso. Ciò realizzerebbe una sorta di “osservatorio fluviale” permanente a scala regionale, che colmerebbe la carenza di dati sui corsi d'acqua minori e migliorerebbe notevolmente la capacità di reazione e pianificazione nei confronti dei fenomeni erosivi e dei rischi idrogeologici connessi.

7. Conclusioni e prospettive

7.1. Sintesi del contributo scientifico

La presente ricerca ha sviluppato e testato un approccio per il monitoraggio delle dinamiche spondali di un corso d'acqua meandriforme di medie dimensioni (il basso Tagliamento), basato sull'integrazione di fotogrammetria UAV multispettrale e tecniche di *change detection*. In sintesi, il contributo scientifico principale di questo lavoro consiste nell'aver dimostrato l'efficacia di un monitoraggio fluviale multiscala e multi-sorgente applicato a un contesto di bacino minore, fornendo al contempo nuovi dati sulle dinamiche recenti.

Sul piano metodologico, lo studio ha mostrato come l'unione di rilievi fotogrammetrici da UAV ad alta risoluzione (2 cm) con l'analisi di immagini satellitari Sentinel consenta una caratterizzazione molto dettagliata e completa dei processi fluviali in atto. È stato utilizzato un *workflow* che combina: generazione di nuvole di punti, DSM e ortofoto RGB e multispettrali da drone, calcolo di differenze planimetriche e mappe di variazione volumetrica per quantificare i fenomeni erosivi, estrazione di indici di vegetazione (NDVI) e umidità (NDWI) da dati fotogrammetrici da UAV e satellitari per valutare gli effetti sulle componenti vegetative, confronto incrociato dei risultati su diverse scale. Questo approccio rappresenta un passo avanti rispetto agli studi settoriali tradizionali: in letteratura spesso i lavori si focalizzano o sull'analisi geomorfologica 3D (erosione, sedimentazione) oppure sull'analisi ecologica di indici spettrali, mentre in questa ricerca si è mostrato il valore aggiunto di considerarli congiuntamente. Il sistema fluviale è stato analizzato nei suoi aspetti abiotici (morfologia fisica) e biotici (vegetazione riparia) come parti interconnesse di un unico insieme dinamico. La metodologia proposta è generale e trasferibile: i protocolli di volo, le procedure di elaborazione e le strategie di integrazione dati possono essere adattati e replicati su altri corsi d'acqua, fornendo una sorta di “*template*” per futuri monitoraggi integrati.

In termini di risultati, la tesi fornisce nuove conoscenze sul comportamento geomorfologico del Tagliamento negli ultimi anni. È stata quantificata l'evoluzione planimetrica 2023-2025 (2017-2025 se si prendono in considerazione i dati regionali) su sette siti test, rilevando arretramenti laterali significativi in corrispondenza di alcune anse, evidenziando processi di migrazione laterale; è stato documentato spazialmente il fenomeno dell'erosione, identificando settori con erosione concentrata e altri relativamente stabili, fornendo conferma empirica dell'eterogeneità tipica dei fiumi meandriformi: la maggior parte dell'erosione si localizza in porzioni limitate, spesso in corrispondenza di anse o di restringimenti, mentre altrove l'alveo risulta più statico; si è dimostrato che anche eventi di piena moderati possono indurre cambiamenti apprezzabili nel breve periodo: ciò implica che il basso Tagliamento mantiene una sensibilità dinamica elevata, un aspetto importante anche in chiave di possibili risposte future a piene più intense; sul versante ecologico, l'analisi NDVI/NDWI ha evidenziato come la vegetazione riparia risponda rapidamente alle piene, con perdite di copertura immediate seguite da potenziali recuperi: questo arricchisce la comprensione dei tempi di resilienza del sistema ripario locale e fornisce dati per confronti con altri fiumi; è stato validato l'uso combinato di dati Sentinel-2 e rilievi UAV per il monitoraggio fluviale: i confronti indicano che Sentinel-2 può cogliere le tendenze generali delle variazioni (soprattutto per superfici >100–200 m²), mentre i sensori dei droni sono necessari per dettagli più fini; sono stati infine elaborati dei prodotti cartografici nuovi, come mappe di erosione e mappe delle variazioni morfologiche, che rappresentano output utili anche per la pianificazione territoriale.

7.2. Limiti dello studio

Pur avendo conseguito risultati significativi, è importante evidenziare i limiti e le circostanze che delimitano la validità dello studio, così da contestualizzare correttamente le conclusioni e orientare futuri approfondimenti. I principali limiti emersi riguardano: la scala temporale ristretta dell'osservazione, alcune assunzioni semplificative nel metodo, e le caratteristiche tecniche dei dati utilizzati.

Un primo limite è la durata limitata del monitoraggio. Il periodo coperto dai rilievi UAV è di circa due anni (settembre 2023 – primavera 2025), un intervallo che consente di cogliere le dinamiche immediate, ma che rappresenta solo una piccola finestra rispetto ai cicli geomorfologici fluviali. I risultati ottenuti potrebbero non essere rappresentativi del comportamento a lungo termine del Tagliamento, specialmente in presenza di ciclicità pluriennali o eventi estremi fuori scala. I tassi di arretramento calcolati potrebbero essere sottostimati rispetto a un periodo più lungo che includa anche eventi eccezionali, oppure potrebbero evidenziare *trend* diversi su periodi decennali. Pertanto, l'inferenza temporale dei dati va considerata con cautela: non è garantito che nei prossimi 5-10 anni l'erosione mantenga le stesse velocità documentate nel 2023-25, specie in un contesto di possibili variazioni nel regime delle piene legate al cambiamento climatico. Idealmente, il monitoraggio andrebbe esteso negli anni futuri per confermare o aggiornare i *trend* individuati.

Un secondo limite riguarda l'estensione spaziale relativamente circoscritta delle aree di studio. L'attenzione si è focalizzata su sette siti distribuiti lungo ~9 km di fiume, selezionati in base a criteri di vulnerabilità e accessibilità. Sebbene tali siti siano stati scelti per essere rappresentativi di diverse condizioni, restano pur sempre campionature all'interno di un sistema fluviale più vasto. È possibile che tratti non inclusi nei *test field* abbiano subito dinamiche differenti o addirittura più intense. Dunque, le conclusioni sull'evoluzione del basso Tagliamento in generale vanno intese prevalentemente per le zone monitorate; non si esclude la presenza di hotspot erosivi localizzati altrove. Inoltre, all'interno dei siti medesimi, l'alta risoluzione comporta volumi di dati elevati e l'impossibilità pratica di coprire continuamente tutto il corso. Questo è un limite intrinseco del compromesso tra alta risoluzione ed estensione del rilievo. Per mitigarlo, sarebbe opportuno in futuro integrare la metodologia con rilievi LiDAR da UAV.

Dal punto di vista tecnico, un limite è dato dalla qualità e tipologia dei sensori utilizzati. Sono stati impiegati un sensore multispettrale a 4 bande che, pur permettendo di calcolare indici NDVI e NDWI, non è equiparabile a un sensore iperspettrale; questo limita la gamma di analisi spettrali possibili. Un altro aspetto è la mancanza di correzione atmosferica sulle ortofoto da UAV: si è assunto che su aree piccole e con distanze di volo ridotte gli effetti atmosferici fossero trascurabili, ma piccoli errori di bilanciamento del colore tra epoche differenti potrebbero aver influenzato leggermente i valori di NDVI differenziale. Allo stesso modo, per le immagini Sentinel-2 si è fatto affidamento sui prodotti di livello 2A (già corretti per atmosfera) e si sono confrontati con le ortofoto UAV senza un passaggio di armonizzazione radiometrica tra le due fonti, sebbene i confronti siano stati qualitativi e non quantitativi diretti.

Un limite importante è costituito dall'approssimazione nelle analisi di incertezza. Si è applicata una soglia LoD95 volumetrica sui dati 3D e considerato l'errore di allineamento; tuttavia, l'analisi dell'incertezza potrebbe essere approfondita maggiormente. Nella presente ricerca si è optato per un approccio pratico e semplificato, ritenuto adeguato data la chiara evidenza di cambiamenti ben sopra il rumore, ma ciò potrebbe introdurre una sovrastima dell'affidabilità in alcune stime marginali.

Un'altra limitazione risiede nella mancata considerazione di alcuni fattori esterni che possono influenzare le dinamiche osservate. Durante il periodo di studio sono avvenute significative opere antropiche nel tratto considerato tra il TF02 ed il TF03 (opere legate alla costruzione del ponte sul tratto di autostrada A4). Queste potrebbero aver inciso localmente sull'erosione o deposizione. La nostra analisi non ha potuto distinguere le cause naturali dei fenomeni da quelle antropiche, assunte come trascurabili.

Infine, un limite pratico è la scalabilità computazionale delle elaborazioni: il processamento di migliaia di immagini e il confronto di nuvole di punti dense ha richiesto risorse *hardware* notevoli e tempi lunghi. Questo è un aspetto spesso trascurato, ma rilevante se si pensa di implementare il sistema operativamente.

In conclusione, pur con i limiti sopra elencati, si ritiene che lo studio fornisca risultati solidi e affidabili per gli scopi prefissati. È però importante non generalizzare: le conclusioni riguardanti entità e distribuzione delle erosioni valgono per il periodo e i siti studiati e potrebbero differire in altri contesti; i metodi impiegati hanno un margine di errore che è stato considerato, ma che dovrebbe sempre accompagnare l'interpretazione dei dati. Riconoscere questi limiti è fondamentale per pianificare opportunamente le ricerche future e le possibili estensioni del lavoro.

7.3. Sviluppo futuri: sensori *hyperspectral*, termografia, AI per la classificazione automatica, monitoraggi post-piena rapidi

Gli esiti di questa ricerca aprono diverse direzioni di approfondimento e miglioramento, sia dal punto di vista scientifico-tecnologico, sia da quello applicativo-operativo. In particolare, si delineano quattro ambiti principali di sviluppo futuro: l'impiego di sensori iperspettrali su UAV, l'uso di tecniche di termografia aerea, l'implementazione di intelligenza artificiale per automatizzare classificazioni e *change detection* e l'istituzione di protocolli per monitoraggi rapidi post-evento. Queste prospettive sono state parzialmente anticipate nella discussione (cfr. par. 6.3), ma meritano una sintesi conclusiva in quanto rappresentano i passi successivi per proseguire ed espandere il lavoro svolto:

- sensori iperspettrali su piattaforma UAV: come evidenziato, la disponibilità di dati spettrali più numerosi potrebbe fornire informazioni di dettaglio sulla vegetazione riparia e sui sedimenti che attualmente non possono essere identificate dall'analisi multispettrale standard. Uno sviluppo futuro è quindi testare l'uso di un sensore iperspettrale montato su drone sul medesimo tratto di fiume. Gli obiettivi di tale estensione sarebbero molteplici: mappatura floristica dettagliata (distinguere specie o gruppi funzionali nella vegetazione riparia, identificare eventuali piante invasive), stima di parametri biofisici (contenuto d'acqua delle foglie, clorofilla, stress da nutrienti) per valutare lo stato di salute dell'ecosistema ripario, analisi dei sedimenti esposti (la firma spettrale può aiutare a riconoscere differenze mineralogiche o la presenza di patine biologiche). In aggiunta, l'uso di camera iperspettrale potrebbe migliorare la separazione fra suolo nudo e residui vegetali secchi, affinando le mappe di erosione: attualmente la distinzione è basata sugli indici NDVI ed NDWI, ma con bande specifiche si potrebbero discriminare meglio sabbie umide, sabbie asciutte e tipologia di sedimento. Dal punto di vista tecnologico, i sensori iperspettrali per UAV stanno diventando sempre più compatti; un possibile ostacolo è il costo e la complessità di calibrazione (vanno gestite correzioni radiometriche più complicate), ma già alcuni studi fluviali li hanno impiegati con successo. Un test iperspettrale sul Tagliamento fornirebbe un contributo importante, realizzando un dataset notevole per un fiume a scala locale. Potrebbe inoltre aprire collaborazioni multidisciplinari, ad esempio con ecologi fluviali interessati a monitorare la biodiversità o la presenza di alghe e macrofite in alveo attraverso firme spettrali;
- estensione della fotogrammetria termica: un ulteriore sviluppo consiste nel consolidare l'utilizzo dei dati termici da drone. Nel presente lavoro le applicazioni termografiche sono state citate come ipotesi o possibile estensione; un passo futuro concreto sarebbe effettuare voli con sensori termici sul campo, soprattutto in condizioni critiche (fine estate con magre pronunciate e forte riscaldamento, oppure inverno con afflussi di acque di falda calde). I dati termici aggiungerebbero un layer informativo importante: si potrebbero creare mappe della temperatura superficiale del fiume e delle sponde che rivelino zone di risorgenza idrica. Ciò ha riflessi diretti sulla comprensione dei processi di stabilità delle sponde: zone costantemente umide per risorgenze interne sono spesso soggette a erosioni e frane di sponda, e anticiparne l'individuazione consente interventi mirati. Un esperimento futuro potrebbe essere quello di effettuare un rilievo fotogrammetrico da UAV subito dopo un evento di piena, utilizzando sia sensori multispettrali sia termici all'alba (quando il contrasto termico tra acqua e terra è massimo) per delineare in dettaglio tutte le pozze residue, infiltrazioni e livelli di saturazione del suolo. Queste informazioni sarebbero utili anche dal punto di vista ecologico per individuare habitat umidi temporanei creati dalla piena. Sul piano tecnico-scientifico, l'integrazione quantitativa di termografia e fotogrammetria aprirebbe un fronte di ricerca: si potrebbero correlare le misure 3D di erosione con gradienti termici, per vedere ad esempio se le zone erose coincidono con zone a forte escursione termica (indicando magari mancanza di

vegetazione e quindi maggior riscaldamento) o con zone a temperatura costante (presenza di acqua di falda);

- automazione tramite AI: uno sviluppo sarà rendere più automatiche le fasi di analisi e interpretazione, sfruttando algoritmi di ML e AI. In prospettiva, come già accennato, si può immaginare di addestrare un modello di *deep learning* per individuare automaticamente segni di erosione o depositi nelle ortofoto, basandosi su esempi etichettati dalle analisi manuali. Un *dataset* di *training* potrebbe essere costruito prendendo porzioni di immagini UAV dove l'erosione è avvenuta e zone di controllo senza cambiamenti, per istruire il modello a distinguere. Così facendo, ogni nuovo rilievo da UAV potrebbe essere processato velocemente dall'AI evidenziando dove ci sono differenze rispetto al precedente, riducendo drasticamente il lavoro dell'operatore e rendendo il monitoraggio più rapido. Un ulteriore ambito è l'analisi predittiva: data una serie temporale sufficiente, algoritmi di apprendimento potrebbero iniziare a predire dove e quanto sarà l'erosione futura, come strumenti di “*early warning*”. Opportuni algoritmi potrebbero prendere in input variabili come curvature dell'alveo, pendenza, vicinanza di ostacoli, caratteristiche della vegetazione, portate di piena, e in output restituire una stima di probabilità di erosione per ciascun tratto, allenandosi sui dati misurati storici. Ovviamente, l'AI non sostituirà il controllo umano ma lo potenzierà, accelerando l'individuazione di anomalie nei big data raccolti. Questo sviluppo richiederà collaborazioni con colleghi di data science e un'operazione di etichettatura iniziale, ma i benefici in termini di gestione operativa (allerta precoce su erosioni incipienti, riduzione del carico di interpretazione manuale) giustificano l'investimento;
- monitoraggi post-piena rapidi e di emergenza: un aspetto applicativo cruciale, emerso anche dalle implicazioni gestionali, è istituzionalizzare la pratica di eseguire rilievi immediatamente successivi alle piene significative. In futuro, si dovrebbe puntare a un'organizzazione tale per cui, non appena le acque defluiscono a livelli di sicurezza praticabile, un gruppo di rilevatori possa rilevare i siti critici colpiti. Ciò fornirebbe dati immediati, utili quasi in tempo reale per valutare i danni. Per fare ciò, è necessario predisporre a monte un piano di emergenza dedicato al rilievo: definire quali soglie di evento attivano la necessità di effettuare un nuovo rilievo, tenere pronta l'attrezzatura anche in condizioni difficili, avere procedure semplificate per l'elaborazione rapida. In questo contesto, ciò potrebbe tradursi nel formalizzare, magari con il supporto della Protezione Civile regionale, un protocollo in cui dopo ogni piena maggiore a una certa soglia idrometrica si faccia un sopralluogo da UAV (analogamente a come si fanno ricognizioni elicotteristiche di emergenza, qui si tratterebbe di farle con droni su scala locale). I test condotti dimostrano che i droni e i sensori utilizzati sono efficaci e rapidi per operare in questi scenari e l'output georeferenziato è immensamente più utile delle foto aeree tipiche dei voli ricognitivi. In prospettiva, un sistema di monitoraggio come quello proposto in questa tesi dovrebbe confluire in un piano di gestione del rischio dove il monitoraggio post-evento è parte integrante del ciclo di risposta ai disastri.

In conclusione, gli sviluppi futuri delineati, dall'adozione di sensori avanzati all'automazione AI, fino alla formalizzazione di monitoraggi rapidi, rappresentano il naturale proseguimento di un percorso di studio nel monitoraggio fluviale che questa tesi ha iniziato a delineare. La rapida evoluzione delle tecnologie geomatiche fa intravedere un prossimo futuro in cui sarà possibile monitorare i fiumi con una completezza e una immediatezza oggi impensabili. Il basso Tagliamento potrebbe beneficiare di tutto ciò sotto forma di una gestione più consapevole, preventiva e adattativa, e al contempo fungerà da laboratorio dove sperimentare e affinare queste innovazioni. In definitiva, il lavoro svolto getta basi sia per migliorare la comprensione scientifica dei processi fluviali a piccola scala, sia per potenziare concretamente le capacità di tutela e intervento sui corsi d'acqua minori, conciliando avanzamento tecnologico e necessità pratiche di salvaguardia del territorio.

Bibliografia

- [1] Boothroyd, R.J., Nones, M., Guerrero, M., 2021. Deriving Planform Morphology and Vegetation Coverage From Remote Sensing to Support River Management Applications. *Frontiers in Environmental Science* Volume 9-2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.657354>;
- [2] Stecca, G., Zolezzi, G., Hicks, D.M., Surian, N., 2018. Reduced braiding of rivers in human-modified landscapes: Converging trajectories and diversity of causes. *Earth-Science Reviews* 188, 291–311. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.10.016>;
- [3] Bertoldi, W., Drake, N.A., Gurnell, A.M., 2011. Interactions between river flows and colonizing vegetation on a braided river: exploring spatial and temporal dynamics in riparian vegetation cover using satellite data. *Earth Surf Processes Landf* 36, 1474–1486. <https://doi.org/10.1002/esp.2166>;
- [4] Eltner, A., Sofia, G., 2020. Structure from motion photogrammetric technique, in: *Developments in Earth Surface Processes*. Elsevier, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>;
- [5] Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M.G., Uijttewaal, W.S.J., 2018. Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach. *Earth Surf. Dynam.* 6, 933–953. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-933-2018>;
- [6] Liao, X., Zhang, Y., Su, F., Yue, H., Ding, Z., Liu, J., 2018. UAVs surpassing satellites and aircraft in remote sensing over China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), 7138–7153. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515511>;
- [7] Woodget, A.S., Austrums, R., Maddock, I.P., Habit, E., 2017, Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *WIREs Water*, 4: e1222. <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>;
- [8] Song, F., Zhang, W., Yuan, T., Ji, Z., Cao, Z., Xu, B., Lu, L., Zou, S., 2024. UAV Quantitative Remote Sensing of Riparian Zone Vegetation for River and Lake Health Assessment: A Review. *Remote Sensing*, 16(19), 3560. <https://doi.org/10.3390/rs16193560>;
- [9] Marchetti, G., Manconi, A., Comiti, F., 2023. Limitations in the use of Sentinel-1 data for morphological change detection in rivers. *International Journal of Remote Sensing*, 44(21), 6642–6669. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2274317>;
- [10] Marchetti, G., Bizzi, S., Belletti, B., Lastoria, B., Comiti, F., Carbonneau, P. E., 2022. Mapping riverbed sediment size from Sentinel-2 satellite data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(10), 2544–2559. <https://doi.org/10.1002/esp.5394>;
- [11] Carbonneau, P.E., Belletti, B., Micotti, M., Lastoria, B., Casaioli, M., Mariani, S., Marchetti, G., Bizzi, S., 2020. UAV-based training for fully fuzzy classification of Sentinel-2 fluvial scenes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (13): 3120–3140. <https://doi.org/10.1002/esp.4955>;
- [12] Winiwarter, L., Anders, K., Höfle, B., 2021. M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 178, 240–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011>;
- [13] Lague, D., Brodu, D., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 82, Pages 10–26, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>;
- [14] Rhee, D.S., Kim, Y.D., Kang, B., Kim, D., 2018. Applications of unmanned aerial vehicles in fluvial remote sensing: An overview of recent achievements. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22, 588–602. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1862-5>;

- [15] Alvarez-Vanhard, E., Corpetti, T., Houet, T., 2021. UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. *Science of Remote Sensing* 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>;
- [16] Navarro, J. A., Algeet, N., Fernández-Landa, A., Esteban, J., Rodríguez-Noriega, P., Guillén-Climent, M. L., 2019. Integration of UAV, Sentinel-1, and Sentinel-2 Data for Mangrove Plantation Aboveground Biomass Monitoring in Senegal. *Remote Sensing*, 11(1), 77. <https://doi.org/10.3390/rs11010077>;
- [17] Zhang, Y., 2024. Effect of river channel planar complexity on riparian vegetation-river flow relationships in arid environments. *Science of The Total Environment*, Volume 912, 168988, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168988>;
- [18] Huylenbroeck, L., Laslier, M., Dufour, S., Georges, B., Lejeune, P., Michez, A., 2020. Using remote sensing to characterize riparian vegetation: A review of available tools and perspectives for managers. *Journal of Environmental Management*, Volume 267, 110652, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110652>;
- [19] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Volume 179, Pages 300-314, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>;
- [20] Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2012. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>;
- [21] Casado, M. R., Gonzalez, R. B., Kriechbaumer, T., Veal, A., 2015. Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery. *Sensors*, 15(11), 27969-27989. <https://doi.org/10.3390/s151127969>;
- [22] Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., De Jong, S.M., 2018. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 73, Pages 428-437, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.016>;
- [23] McGwire, K. C., 2019. Optimized Stratification for Mapping Riparian Vegetation in Arid and Semiarid Environments. *Remote Sensing*, 11(14), 1638. <https://doi.org/10.3390/rs11141638>;
- [24] Fu, B., Burgher, I., 2015. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, Volume 113, Pages 59-68, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.010>;
- [25] Michez, A., Piégay, H., Lisein, J., Claessens, H., Lejeune, P., 2016. Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environ Monit Assess* 188, 146. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4996-2>;
- [26] Chang, D., Wang, Z., Ning, X., Li, Z., Zhang, L., Liu, X., 2022. Vegetation changes in Yellow River Delta wetlands from 2018 to 2020 using PIE-Engine and short time series Sentinel-2 images. *Front. Mar. Sci.* 9, 977050. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.977050>;
- [27] Avanzi, A., Frank, E., Righetto, M., Fattorelli, S., 2013. LIDAR DATA RESOLUTION VERSUS HYDRO-MORPHOLOGICAL MODELS FOR FLOOD RISK ASSESSMENT. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W3, 119–124. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W3-119-2013>;
- [28] Smith, M. W., Vericat, D., 2015. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40: 1656–1671. doi: 10.1002/esp.3747;
- [29] Bozzolan, E., Brenna, A., Surian, N., Carbonneau, P., Bizzi, S., 2023. Quantifying the Impact of Spatiotemporal Resolution on the Interpretation of Fluvial Geomorphic Feature Dynamics From Sentinel 2 Imagery: An Application on a Braided River Reach in Northern Italy. *Water Resources Research*, 59(12). <https://doi.org/10.1029/2023WR034699>;

-
- [30] NASA Earthdata (2017, agg. 2024). Map Regional Inundation with Sentinel-1 using Sentinel-1 Toolbox – Data Recipe, Alaska Satellite Facility DAAC. Pubblicato il 3 dicembre 2017, ultimo aggiornamento 3 dicembre 2024. Disponibile su: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/data-recipes/map-regional-inundation-sentinel-1-using-sentinel-1-toolbox> (consultato il 5 giugno 2025);
 - [31] Freihardt, J., Frey, O., 2023. Assessing riverbank erosion in Bangladesh using time series of Sentinel-1 radar imagery in the Google Earth Engine. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 23, 751–770. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-751-2023>;
 - [32] Lane, S.N., Westaway, R.M., Murray Hicks, D., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surf. Process. Landforms*, 28: 249-271. <https://doi.org/10.1002/esp.483>;
 - [33] Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. Sear, D.A., 2009. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf. Process. Landforms*, 35: 136-156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>;
 - [34] Schaffrath, K.R., Belmont, P., Wheaton, J.M., 2015. Landscape-scale geomorphic change detection: Quantifying spatially variable uncertainty and circumventing legacy data issues. *Geomorphology*, Volume 250, Pages 334-348, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.020>;
 - [35] Alexiou, S., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A., Papanikolaou, I., Psomiadis, E., Reicherter, K., 2021. Comparing High Accuracy t-LiDAR and UAV-SfM Derived Point Clouds for Geomorphological Change Detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), 367. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060367>;
 - [36] Bertalan, L., Rodrigo-Comino, J., Surian, N., Michalková, M.S., Kovács, Z., Szabó, S., Szabó, G., Hooke, J., 2019. Detailed assessment of spatial and temporal variations in river channel changes and meander evolution as a preliminary work for effective floodplain management. The example of Sajó River, Hungary. *Journal of Environmental Management*, Volume 248, 109277, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109277>;
 - [37] Downward, S. R., Gurnell, A. M., Brookes, A., 1994. A methodology for quantifying river channel planform change using GIS. In: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport – Proceedings of the Canberra Symposium, December 1994*, IAHS Publication n. 224, pp. 449-456, <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1141066>;
 - [38] Rynkiewicz, A., Hościło, A., Aune-Lundberg, L., Nilsen, A. B., Lewandowska, A., 2025. Detection and Quantification of Vegetation Losses with Sentinel-2 Images Using Bi-Temporal Analysis of Spectral Indices and Transferable Random Forest Model. *Remote Sensing*, 17(6), 979. <https://doi.org/10.3390/rs17060979>;
 - [39] Bid S., 2016. Change Detection of Vegetation Cover by NDVI Technique on Catchment Area of the Panchet Hill Dam, India. *International Journal of Research in Geography (IJRG)*, 2 (3): 11-20. DOI 10.20431/2454-8685.0203002;
 - [40] Fu, B., Burgher, I., 2015. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, Volume 113, Pages 59-68, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.010>;
 - [41] Chang, D., Wang, Z., Ning, X., Li, Z., Zhang, L., Liu, X., 2022. Vegetation changes in Yellow River Delta wetlands from 2018 to 2020 using PIE-Engine and short time series Sentinel-2 images. *Frontiers in Marine Science*, 9: 977050. DOI 10.3389/fmars.2022.977050;
 - [42] Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G., 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>;
 - [43] Klápště, P., Fogl, M., Barták, V., Gdulová, K., Urban, R., Moudrý, V., 2020. Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground filtering algorithms with UAV photogrammetry-based and LiDAR point clouds. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1672–1694. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267>;

- [44] Wang, Y., Koo, K.Y., 2022. Vegetation Removal on 3D Point Cloud Reconstruction of Cut-Slopes Using U-Net. *Applied Sciences*, 12(1), 395. <https://doi.org/10.3390/app12010395>;
- [45] Surian, N., Fontana, A., 2017. The Tagliamento River: The Fluvial Landscape and Long-Term Evolution of a Large Alpine Braided River. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26194-2_13;
- [46] Ziliani, L., Surian, N., 2012. Modelling and prediction of channel morphology evolution in a large braided river (Tagliamento River, Italy). 9784-;
- [47] Comune di Ronchis (s.d.). VAS – Verifica di assoggettabilità (Variante puntuale al PRGC). Relazione tecnica, 98 pp., Ronchis (UD). Disponibile su: <https://www.comune.ronchis.ud.it/media/files/030097/attachment/VAS.pdf> (consultato il 5 giugno 2025);
- [48] Palma M., 2014. Valutazione della pericolosità da dinamica morfologica nei fiumi Tagliamento e Fella (Friuli-Venezia Giulia). Tesi di Laurea Magistrale in Scienze della Natura, Università degli Studi di Padova, 101 pp. Disponibile su: [https://thesis.unipd.it/retrieve/5c07e9e0-2d9e-415f-955a-f85bc1e858d7/Tesi_Palma_\(Surian\).pdf](https://thesis.unipd.it/retrieve/5c07e9e0-2d9e-415f-955a-f85bc1e858d7/Tesi_Palma_(Surian).pdf) (consultato il 5 giugno 2025);
- [49] Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P. J., 2018. Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. *Remote Sensing*, 10 (7): 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>;
- [50] Tu, Y.H., Phinn, S., Johansen, K., Robson, A., 2018. Assessing Radiometric Correction Approaches for Multi-Spectral UAS Imagery for Horticultural Applications. *Remote Sensing*, 10 (11): 1684. DOI 10.3390/rs10111684;
- [51] Poncet, A. M., Knappenberger, T., Brodbeck, C., Fogle, M., Shaw, J. N., Ortiz, B. V., 2019. Multispectral UAS Data Accuracy for Different Radiometric Calibration Methods. *Remote Sensing*, 11 (16): 1917. DOI 10.3390/rs11161917;
- [52] Teppati Losè, L., Chiabrando, F., Giulio Tonolo, F., 2020. Boosting the Timeliness of UAV Large-Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 578. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100578>;
- [53] James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280: 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>;
- [54] Tonkin, T.N., Midgley, N.G., 2016. Ground-Control Networks for Image-Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV-Derived Imagery and Structure-from-Motion Photogrammetry. *Remote Sensing*, 8 (9): 786. <https://doi.org/10.3390/rs8090786>;
- [55] Šiljeg, A., Panda, L., Marinović, R., Krvavica, N., Domazetović, F., Jurišić, M., Radočaj, D., 2023. Infiltration Efficiency Index for GIS Analysis Using Very-High-Spatial-Resolution Data. *Sustainability*, 15 (21): 15563. DOI 10.3390/su152115563;
- [56] Agisoft LLC (2023). Agisoft Metashape Professional Edition – User Manual, Version 2.0. 232 pp., San Pietroburgo. Disponibile su: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf (consultato il 5 giugno 2025);
- [57] Mayer, C., Gomes Pereira, L. M., Kersten, T. P., 2018. A Comprehensive Workflow to Process UAV Images for the Efficient Production of Accurate Geo-information. In: IX National Conference on Cartography and Geodesy (CNCG 2018), Porto, 24-25 ottobre 2018, 8 pp.;
- [58] James, M. R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 (10): 1413-1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>;

-
- [59] Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, 4 (6): 1573-1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>;
 - [60] Brodu, N., Lague, M., 2012. 3D terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 121-134. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006;
 - [61] Curcio, A. C., Peralta, G., Aranda, M., Barbero, L., 2022. Evaluating the Performance of High Spatial Resolution UAV-Photogrammetry and UAV-LiDAR for Salt Marshes: The Cádiz Bay Study Case. *Remote Sensing*, 14 (15): 3582. DOI 10.3390/rs14153582;
 - [62] Tomsett, C., Leyland, J., 2023. Using repeat UAV-based laser scanning and multispectral imagery to explore eco-geomorphic feedbacks along a river corridor. *Earth Surface Dynamics*, 11: 1223-1249. DOI 10.5194/esurf-11-1223-2023;
 - [63] Duffy, J. P., Pratt, L., Anderson, K., Land, P. E., Shutler, J. D., 2018. Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200: 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.001>;
 - [64] Daryaei, A., Sohrabi, H., Atzberger, C., Immitzer, M., 2020. Fine-scale detection of vegetation in semi-arid mountainous areas with focus on riparian landscapes using Sentinel-2 and UAV data. *Computers & Electronics in Agriculture*, 177: 105686. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105686>;
 - [65] Cuca, B., 2020. Copernicus Sentinel imagery for more risk-resilient historic cities in coastal zones: contribution to the monitoring of Albenga archaeological site and delta of river Centa. *Applied Geomatics*, 14: 67-78. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00340-5>;
 - [66] Merrick, T., Bennartz, R., Jorge, M. L. S. P., Merrick, C., Bohlman, S. A., Silva, C. A., Pau, S., 2023. Comparing phenology of a temperate deciduous forest captured by solar-induced fluorescence and vegetation indices. *Remote Sensing*, 15 (21): 5101. <https://doi.org/10.3390/rs15215101>;
 - [67] Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G., 2005. Change detection on point cloud data acquired with a ground laser scanner. In: *Proceedings of the ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser Scanning 2005”*, Enschede (Paesi Bassi), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-3/W19: 30-35;
 - [68] Li, Y., Liu, P., Li, H., Huang, F., 2021. A Comparison Method for 3D Laser Point Clouds in Displacement Change Detection for Arch Dams. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (3): 184. DOI 10.3390/ijgi10030184;
 - [69] American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS) (2011). *LAS Specification, Version 1.4 – R6*. Bethesda (MD), 18 pp. Disponibile su: https://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/LAS_1-4_R6.pdf (consultato il 6 giugno 2025);
 - [70] Pettorelli, N., Lurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., Turner, W., 2014. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 51(4): 839–848. DOI 10.1111/1365-2664.12261;
 - [71] Weier, J., Herring, D., 2000. *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php;
 - [72] Thenkabail, P. S., Lyon J. G., Huete A., 2011. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press, 10.13140/2.1.2985.3127;
 - [73] Rodriguez, J., Macciotta, R., Hendry, M.T., Roustaei, M., Grapel, C., Skirrow, R., 2020. UAVs for monitoring, investigation, and mitigation design of a rock slope with multiple failure mechanisms—a case study. *Landslides* 17, 2027–2040. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01416-4>;

-
- [74] Cook, K. L., 2017. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278: 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>;
 - [75] Hawley, R. J., MacMannis, K. R., Wooten, M. S., Fet, E. V., Korth, N. L., 2020. Suburban stream erosion rates in northern Kentucky exceed reference channels by an order of magnitude and follow predictable trajectories of channel evolution, *Geomorphology*, Volume 352, 106998, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106998>;
 - [76] CloudCompare Team, 2023. CloudCompare – 3D point cloud and mesh processing software: User Manual v.2.13. EDF R&D, Telecom ParisTech. Disponibile su: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Distances_Computation (consultato il 6 giugno 2025);
 - [77] Cook, K. L., Dietze, M., 2019. Short Communication: A simple workflow for robust low-cost UAV-derived change detection without ground control points. *Earth Surf. Dynam.*, 7, 1009–1017, <https://doi.org/10.5194/esurf-7-1009-2019>;
 - [78] Brasington, J., Vericat, D. and Rychkov, I., 2012. Modeling River Bed Morphology, Roughness, and Surface Sedimentology Using High Resolution Terrestrial Laser Scanning. *Water Resources Research*, 48, W11519. <https://doi.org/10.1029/2012wr012223>;
 - [79] Brasington J., Langham J., Rumsby B., 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53 (3-4): 299-316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3);
 - [80] Hooke J. M., 2003. River meander behaviour and instability: a framework for analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 28 (2): 238-253. <https://doi.org/10.1111/1475-5661.00089>;
 - [81] Ziliani, L., Surian, N., 2016. Reconstructing temporal changes and prediction of channel evolution in a large Alpine river: the Tagliamento river, Italy. *Aquat Sci* 78, 83–94. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0431-6>;
 - [82] Drori, R., Dan, H., Sprintsin, M., Sheffer, E., 2020. Precipitation-Sensitive Dynamic Threshold: A New and Simple Method to Detect and Monitor Forest and Woody Vegetation Cover in Sub-Humid to Arid Areas. *Remote Sensing*, 12(8): 1231. <https://doi.org/10.3390/rs12081231>;
 - [83] Albano, C. M., McGwire, K. C., Hausner, M. B., McEvoy, D. J., Morton, C. G., Huntington J. L., 2020. Drought Sensitivity and Trends of Riparian Vegetation Vigor in Nevada, USA (1985–2018). *Remote Sensing*, 12(9): 1362. <https://doi.org/10.3390/rs12091362>;
 - [84] Gao, B., 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, Volume 58, Issue 3, Pages 257-266, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3);
 - [85] McFeeters, S.K., 1996. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>;
 - [86] Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>;
 - [87] European Space Agency (ESA). Sentinel-2 – ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. eoPortal Directory. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-2>;
 - [88] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Vol. 1, Section A (pp. 309–317). NASA Goddard Space Flight Center;

- [89] Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia. Modalità operative del servizio di piena – Allegati A e B. Direzione centrale ambiente ed energia, Protezione civile regionale. Disponibile su: https://www.regione.fvg.it/rafvig/export/sites/default/RAFVG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali/FOGLIA206/allegati/Modalita_servizio_di_piena_allegati_A_e_B.pdf (consultato il 6 giugno 2025);
- [90] Martino, A., Gerla, F., Balletti, C., 2023. Multi-scale and multi-sensor approaches for the protection of cultural natural heritage: The island of Santo Spirito in Venice. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-M-2-2023, 1027–1034. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1027-2023>;
- [91] Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>;
- [92] Adeli, S., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L.J., Brisco, B., Tamiminia, H., Shaw, S., 2020. Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review. *Remote Sensing* 12, 2190. <https://doi.org/10.3390/rs12142190>;
- [93] Alaska Satellite Facility (ASF). ASF Vertex Data Portal. University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute. Disponibile su: <https://search.asf.alaska.edu> (consultato il 6 giugno 2025);
- [94] Rainato, R., Picco, L. L., Cavalli, M., Mao, L. L., Delai, F., Ravazzolo, D., Lenzi, M.A., 2013. Evaluation of short-term geomorphic changes along the Tagliamento river using LiDAR and terrestrial laser scanner surveys. *Journal of Agricultural Engineering*, 44, art. no. e15, pp. 80 - 84, DOI: 10.4081/jae.2013.s2.e15;
- [95] Li, S., Zhou, Z., Ma, R., Liu, S., Guan, Q., 2023. Extracting subpixel vegetation NDVI time series for evaluating the mixed pixel effect on GPP estimation in urban areas. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 3222–3238. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2246945>;
- [96] Xu, B., Li, J., Park, T., Liu, Q., Zeng, Y., Yin, G., Yan, K., Chen, C., Zhao, J., Fan, W., Knyazikhin, Y., Myneni, R.B., 2020. Improving leaf area index retrieval over heterogeneous surface mixed with water. *Remote Sensing of Environment* 240, 111700. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111700>;
- [97] Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia. Rilievo LIDAR ad altissima densità – dataset Inspire FRIUVE:m10856-cc-il1647. Geoportale INSPIRE, Commissione Europea. Disponibile su: https://inspire-geoportal.ec.europa.eu/srv/api/records/r_friuve:m10856-cc-il1647 (consultato il 6 giugno 2025);
- [98] Liu, S., Wu, Y., Zhang, G., Lin, N., Liu, Z., 2023. Comparing Water Indices for Landsat Data for Automated Surface Water Body Extraction under Complex Ground Background: A Case Study in Jilin Province. *Remote Sensing*, 15(6), 1678. <https://doi.org/10.3390/rs15061678>;
- [99] Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., Proud, S. R., 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140: 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>;
- [100] Tha, T., Piman, T., Bhatpuria, D., Ruangrassamee, P., 2022. Assessment of Riverbank Erosion Hotspots along the Mekong River in Cambodia Using Remote Sensing and Hazard Exposure Mapping. *Water*, 14(13), 1981. <https://doi.org/10.3390/w14131981>;
- [101] Donovan, M., Belmont, P., Notebaert, B., Coombs, T., Larson, P., Souffront, M., 2019. Accounting for uncertainty in remotely-sensed measurements of river planform change. *Earth-Sci. Rev.* 193, 220–236. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.009>;

- [102] Micieli, M., Botter, G., Mendicino, G., Senatore, A., 2022. UAV Thermal Images for Water Presence Detection in a Mediterranean Headwater Catchment. *Remote Sensing*, 14(1), 108. <https://doi.org/10.3390/rs14010108>.