



**ISPRA**  
Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

## **IRIS – Italian Research and development Initiative for Spaceborne river monitoring**



### **Accordo di collaborazione tecnico-scientifica tra l'ISPRA e il DEIB del Politecnico di Milano**

**CUP: I56J17000490005**

### **RELAZIONE TECNICA FINALE**

#### **ISPRA**

Stefano Mariani  
(Responsabile ISPRA dell'Accordo)

Martina Bussetti

Marco Casaioli

Barbara Lastoria

Francesca Piva

#### **DEIB**

Andrea Castelletti  
(Responsabile DEIB dell'Accordo)

Simone Bizzi

Barbara Belletti

Marco Micotti

Giulia Marchetti

Francesco Asaro

Claudio Prati

Patrice Carbonneau  
(Durham University, Geography Dept.)

**Dicembre 2019**



## Indice

Premessa.....	5
1 Introduzione.....	5
2 Assemblaggio macro-unità morfologiche SUM e loro traiettoria storica: indicatore 1 .....	9
2.1 Classificatore macro-unità morfologiche basato su dati S2.....	9
2.1.1 Creazione della maschera del corridoio fluviale.....	10
2.1.2 Calibrazione e validazione del classificatore S2 .....	10
2.2 Applicazione del classificatore alla serie storica di dati S2 per la generazione di indici e <i>raster</i> delle macro-unità morfologiche.....	15
2.3 Classificatore macro-unità “unità sommerse” basato su dati S1.....	18
3 Estrazione di informazioni a partire dall’assemblaggio delle macro-unità morfologiche: indicatori 3, 4 e 5 .....	23
3.1 Indicatore 3: larghezza alveo bagnato e stima della portata.....	23
3.2 Indicatore 4: larghezza alveo di piena .....	28
3.3 Indicatore 5: indicatori di processo e dinamica morfologica (variazioni planimetriche) .....	30
4 Indicatori 2 e 5: Classi granulometriche e processi d’alveo integrando S1 e S2.....	34
4.1 Stima della Granulometria da dati di S2 .....	34
4.2 Analisi della coerenza e dell’intensità da S1 per la valutazione qualitativa dei cambiamenti morfologici avvenuti nel sito del fiume Po .....	39
4.2.1 Analisi coerenza.....	41
4.2.2 Analisi intensità .....	45
5 Osservazioni sul monitoraggio idromorfologico a livello nazionale da dati telerilevati satellitari e da drone .....	47
5.1 Indicatore 1: mappatura habitat (macro-unità SUM) .....	47
5.2 Indicatore 3: stima della portata .....	50
5.3 Indicatore 4: delineazione larghezza alveo di piena.....	50
5.4 Indicatori 2 e 5: caratterizzazione del substrato e indicatori di dinamica morfologica.....	51
5.5 Operatività e fattibilità del monitoraggio idromorfologico a scala nazionale basato su dati Copernicus e acquisizioni da drone .....	52
Bibliografia .....	56

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Lista degli indicatori oggetto dell’accordo, con indicazione dei dati di campo/di base e dei dati Copernicus Sentinel utilizzati. Legenda: DEM, <i>Digital Elevation Model</i> ; GPS, <i>Global Positioning System</i> . ....	6
Tabella 2 – Date delle acquisizioni S2 utilizzate per creare il dataset RGB-S2 di verità a terra. ....	13
Tabella 3 – Risultati dei vari esperimenti di calibrazione e validazione condotti utilizzando i dataset di verità a terra drone e RGB S2. ....	14
Tabella 4 – Elenco delle acquisizioni sul bacino del Po e Sesia con esito dell’algoritmo di classificazione. ....	20
Tabella 5 – Valori di Precision, Recall e f1-score del classificatore S1 generati validando sul dataset RGB-S2 e sul dataset drone. ....	22
Tabella 6 – Trattati, tipologia di dati, stazioni idrometriche utilizzate e <i>performance</i> dei modelli di regressione area/portata generati. Legenda: CS, canale singolo; CM, canali multipli; MAE, errore assoluto medio. ....	24
Tabella 7 - Indice di correlazione di Pearson tra le bande S2 e il valore di D50 osservati dal dataset di verità a terra.....	35

## Indice delle Figure

Figura 1 – Diagramma di Gantt delle attività previste. Legenda: APR, aeromobile a pilotaggio remoto; DEM, <i>Digital Elevation Model</i> ; S1, Sentinel-1; S2, Sentinel-2. Milestone: M0, piano delle attività; M1, Relazione tecnica intermedia n. 1; M2, Relazione tecnica intermedia n. 2; M3, Relazione tecnica finale. Il riquadro blu si riferisce alle attività svolte nell’ultima fase del progetto e che sono descritte nella presente Relazione tecnica finale.....	7
Figura 2 – Diagramma di flusso delle attività del presente accordo così come definite nel Work Package “Morfologia fluviale” della Convenzione ASI-ISPRA “Habitat Mapping” (Fonte: Deliverable n. 16 “Requisiti di Sistema”). Nei riquadri neri sono comprese ed evidenziate le attività svolte e i relativi prodotti ottenuti nelle varie fasi del progetto, inclusi i prodotti descritti nelle Relazioni tecniche intermedie corrispondenti alle Milestone M1 e M2 e i prodotti descritti nella presente Relazione tecnica finale corrispondenti alla Milestone M3. ....	7
Figura 3 – Esempio dei dataset di calibrazione e validazione utilizzati come verità a terra: (a) immagine Sentinel-2 RGB a 10 m e poligoni classificati (dataset RGB-S2; agosto 2018); (b) classificazione da drone delle macro-unità per il sito del Po (dataset drone; settembre 2019). L’immagine in (b) riporta il dettaglio della zona evidenziata dal rettangolo rosso in (a); come sfondo si è tenuta la stessa RGB da S2. ....	12
Figura 4 – Importanza relativa delle bande S2 per il modello 5 di classificatore S2. ....	15
Figura 5 – <i>Tile</i> e corridoi fluviali di applicazione del classificatore S2. ....	16
Figura 6 – Risultato classificazione in data 26/06/2019 per un tratto del fiume Po. Le aree mancanti (pixel bianchi) mostrano le zone coperte da nuvole. In celeste le unità in alveo sommerse, in verde la vegetazione in alveo e ripariale e in marrone chiaro le unità in alveo emerse. ....	16
Figura 7 – Mappa di frequenza mediata per mese per unità emerse (alto) e sommerse (basso). La frequenza è normalizzata tra zero e uno.....	17
Figura 8 – Mappa di frequenza mediata per mese (sinistra) e pura (destra). ....	18
Figura 9 – Esempio di classificazione andata a buon fine (sx) e con cattiva convergenza (dx).....	19
Figura 10 – Esempio dell’istogramma dell’immagine nel dominio trasformato con soglia ben individuabile (grafico a sinistra) e non (grafico a destra). ....	20
Figura 11 – Tratto 20 del Po (PO_20), a valle della confluenza con il Sesia, in data 09/09/2018: confronto delle unità sommerse derivate da S2 (celeste) e da S1 (blu). ....	22

Figura 12 – Localizzazione delle stazioni idrometriche utilizzate lungo la rete idrografica gerarchizzata secondo la descrizione di Strahler e dei tratti analizzati per il calcolo dell'indicatore 3. Fiume Sesia: tratti SE_02, SE_03, SE_04, SE_10; Fiume Po: tratto PO_12.....	24
Figura 13 – Area delle macro-unità “unità sommerse” in funzione delle portate per i tratti PO_12 (in alto) e SE_10 (in basso): i punti blu corrispondono a tutte le date disponibili da S2 e il diametro del punto è inversamente proporzionale alla copertura nuvolosa; i punti arancioni corrispondono alle immagini S2 con copertura nuvolosa < 20%; i triangoli verdi corrispondono ai dati estratti da immagini S1. ....	25
Figura 14 – Valori di portata predetti versus osservati per i modelli del PO_12 (in alto) e del SE_10 (in basso) ottenuti a partire da dati S2. ....	27
Figura 15 – Alveo di piena (sinistra) e alveo attivo (destra) individuati in due porzioni dei tratti SE_06 (in alto) e SE_10 (in basso) del fiume Sesia, rispettivamente a morfologia <i>wandering</i> e meandriforme. Le porzioni bagnate isolate possono corrispondere a: imprecisioni legate al numero di osservazioni disponibili (da escludere in fase di <i>post-processing</i> ); pozze isolate in corrispondenza di canali secondari abbandonati; depressioni in corrispondenza di suolo a granulometria fine e impermeabile con persistenza di acqua (incluse pozzanghere).....	29
Figura 16 – Piana inondabile individuata in due porzioni dei tratti SE_06 (sinistra) e SE_10 (destra) del fiume Sesia, rispettivamente a morfologia <i>wandering</i> e meandriforme. Per le porzioni bagnate isolate valgono gli stessi commenti fatti per Figura 15. ....	30
Figura 17 – Grafico del rapporto tra unità sommerse e unità sommerse + unità emerse per il fiume Po: in ascissa sono riportati i codici dei tratti fluviali da monte verso valle, mentre in ordinata sono riportati i mesi in cui viene calcolato il rapporto medio mensile. ....	31
Figura 18 – Ortofoto dei tratti PO_07 e PO_12 del fiume Po (immagini TMS di <i>Google Satellite</i> disponibili per QGIS). Il tratto PO_07 (a) è a canale singolo con poca presenza di barre, mentre il tratto PO_12 (b) è a canali multipli di tipo <i>wandering</i> . ....	31
Figura 19 – Istogramma della distribuzione delle macro-unità “unità sommerse”, “unità emerse” e “unità di vegetazione in alveo e ripariale” per il tratto PO_07 (a) e il tratto PO_12 (b) del fiume Po. I valori riportati sono riferiti alle medie mensili. ....	33
Figura 20 – Risultato dell'applicazione del classificatore alla serie temporale lungo i corridoi di Po e Sesia ( <i>tile TMR</i> ). (a) Immagine RGB in falsi colori ottenuta dalle frequenze medie mensili delle classi di “unità sommerse” (banda blu), “unità emerse” (banda rossa) e “unità di vegetazione in alveo e ripariale” (banda verde). (b) Dettaglio del tratto SE_10 lungo il Sesia, identificato con il rettangolo rosso in (a). L'immagine di fondo utilizzata in (a) è estratta da OpenStreetMap per QGIS mentre quelle in (b) sono estratte dal TMS di <i>Google Satellite</i> per QGIS.....	33
Figura 21 – Aumento e diminuzione della granulometria a seconda dei processi di erosione e deposizione avvenuti.....	34
Figura 22 – Associazione del D50 ricavato tramite <i>photosieving</i> dalle immagini da drone al pixel S2 corrispondente e relative scale. A sinistra: esempio di unità emersa campionata sull'immagine RGB di S2; al centro: zoom all'interno dell'unità emersa in cui sono indicati, con pallini viola, i pixel ai quali è stato associato un valore di D50 calcolato a partire dall'immagine drone corrispondente; a destra esempio di immagine da drone utilizzata per un particolare pixel. ....	35
Figura 23 – Correlazione tra B12 e i valori D50 osservati dal dataset di verità a terra. ....	36
Figura 24 – Granulometria media (D50) osservata e predetta per le 51 immagini analizzate. ....	37
Figura 25 – Valori dei coefficienti per le bande S2 per il modello lineare di <i>Figura 24</i> .....	37
Figura 26 – Barre selezionate (in rosso) lungo circa 500 km dell'asta del Po sulle quali è stato applicato il modello. A destra è riportato uno zoom riferito a un esempio di barra selezionata. ....	38

Figura 27 – Profilo longitudinale dei valori di D50 predetti dal modello lungo il fiume Po per i pixel selezionati (punti rossi) e di quelli osservati (triangoli verdi), ottenuti dalle acquisizioni tramite drone e utilizzati nella fase di calibrazione del modello (v. <i>Figura 24</i> ). .....	39
Figura 28 – Portata della stazione Isola S. Antonio, situata subito a monte del sito del Po analizzato, tra febbraio e luglio 2018. ....	40
Figura 29 – Sito di studio sul fiume Po, immagini estratte da planet.com. A sinistra la barra di sedimento come appariva il giorno 13 febbraio 2018. Al centro è visibile la barra di sedimento inondata il 16 marzo 2018, a seguito dell’evento di piena e il canale secondario, in sponda sinistra, che ne è risultato. A destra, la barra in stagione estiva, dove si nota il canale secondario ancora parzialmente attivo. ....	40
Figura 30 – <i>Dem of Difference</i> (DoD) tra settembre 2017 e 2018 (sinistra) e ortofoto di settembre 2018 con l’indicazione dei processi che hanno interessato le varie porzioni di alveo (destra) per la zona analizzata in corrispondenza del sito sul fiume Po.....	41
Figura 31 – Mappa di coerenza per la zona di erosione, da settembre 2017 a ottobre 2018.....	42
Figura 32 – Mappa di coerenza per la zona di deposizione, da settembre 2017 a ottobre 2018.....	43
Figura 33 – Mappa di coerenza per la zona stabile, da settembre 2017 a ottobre 2018. ....	43
Figura 34 – Barra di studio inondata dalla piena del 12 aprile 2018, immagine estratta da planet.com. ....	44
Figura 35 – Analisi della distribuzione dell’intensità da S1 nello spazio sul sito del Po per 4 date. Valori crescenti d’intensità passano dal blu al verde fino al giallo. Per l’immagine in RGB corrispondente si rimanda alla <i>Figura 30</i> . ....	45
Figura 36 – Dettaglio delle ortofoto da drone sulla porzione di barra interessata dai cambiamenti morfologici. A sinistra: ortofoto di settembre 2017. A destra: ortofoto di settembre 2018. Per la localizzazione delle zone di erosione, deposizione e stabile si rimanda alla <i>Figura 30</i> . ....	46
Figura 37 – Classificazione applicata all’acquisizione da S2 relativa alla data del 12/04/2016 lungo il tratto PO_09: si noti che parte dei pixel appartenenti alle unità sommerse (alveo bagnato, in celeste) è stata classificata come vegetazione in alveo e ripariale (zone in verde, all’interno dell’alveo bagnato) probabilmente dovuta all’ombra delle nuvole o per la possibile presenza di materiale legnoso. ....	48
Figura 38 – Esempio di indice aggregato di macro-unità (a), ottenuto combinando le frequenze medie mensili delle classi di macro-unità in un’immagine RGB in falsi colori (rosso=unità emerse; verde=vegetazione in alveo e ripariale; blu=unità sommerse), e relativa configurazione delle unità morfologiche osservata da Drone per il sito del Po (b) (estratto dalla Relazione tecnica intermedia n.2). In (a) il riquadro nero indica la zona classificata a partire da immagini drone mostrata in (b). ....	49

## Premessa

La presente Relazione tecnica finale si inserisce all'interno dell'accordo di collaborazione tecnico-scientifica tra l'Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale (ISPRA) e il Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria (DEIB) del Politecnico di Milano per attività di sviluppo, applicazione prototipale e implementazione pre-operativa, nell'ambito della **Convenzione Operativa ASI-ISPRA "Habitat Mapping"**, di procedimenti, metodologie e strumenti applicativi in grado di supportare e agevolare, tramite la produzione semi-automatica da dati satellitari di parte degli indicatori previsti dal protocollo IDRAIM-Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua (Rinaldi et al., 2014, 2016a) per la valutazione da parte degli Enti territoriali preposti dello stato morfologico dei sistemi fluviali ai sensi della **Direttiva 2000/60/CE** e della **Direttiva 2007/60/CE** e delle norme di recepimento italiane.

In particolare, oggetto della Relazione è l'attività di collaborazione per la stima e la calibrazione di un set di indicatori idromorfologici del protocollo IDRAIM a partire da dati Sentinel-1 e Sentinel-2 e da campagne di misura mediante acquisizioni da drone e rilievi GPS, aventi lo scopo di definire i processi per la creazione semi-automatica di indicatori idromorfologici, di cui all'art. 3.1, lett. c) dell'accordo. Tale attività, svolta nell'ambito di "Habitat Mapping", prende il nome di **"IRIS - Italian Research and development Initiative for Spaceborne river monitoring"** (v. [http://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/idro.html#HabitatMapping](http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/idro.html#HabitatMapping); <https://www.researchgate.net/project/Italian-Research-and-development-Initiative-for-Spaceborne-river-monitoring-IRIS>).

La presente Relazione corrisponde alla **Milestone M3** del "Piano delle attività" riportato nel Report iniziale (**Milestone M0**, settembre 2017). Parte integrante sono le Relazioni tecniche intermedie n.1 e 2 (**Milestone M1** e **M2**) redatte rispettivamente a gennaio 2018 e gennaio 2019. È stato, inoltre, predisposto un allegato digitale per descrivere nel dettaglio la struttura, le funzionalità e i risultati dei processi sviluppati nell'ambito dell'accordo. Tale allegato digitale è disponibile nell'area del sistema LaViSam di ISPRA dedicata alle attività del Work Package 8000 "Morfologia fluviale" di "Habitat Mapping".

## 1 Introduzione

L'obiettivo tecnico-scientifico specifico dell'accordo di collaborazione tra ISPRA e DEIB è quello di utilizzare il telerilevamento ottico multispettrale e radar ad apertura sintetica (SAR-Synthetic Aperture Radar), rispettivamente dai dati delle missioni Sentinel-2 (S2) e Sentinel-1 (S1) del Programma Europeo di osservazione della terra Copernicus (v. <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites>), integrato con osservazioni di campo, per ricavare alcuni indicatori idromorfologici utili ai fini della caratterizzazione e valutazione delle condizioni idromorfologiche di un corso d'acqua secondo la metodologia IDRAIM (Rinaldi et al., 2014, 2016a) e SUM-Sistema di rilevamento e classificazione delle unità morfologiche dei corsi d'acqua (Rinaldi et al., 2015, 2016b; Belletti et al., 2017).

In **Tabella 1** è indicata la lista degli indicatori potenzialmente estraibili dai dati Sentinel e le relative fonti di dati (da rilievi di campo e sensore Sentinel interessato). Tali indicatori risultano utili ai fini della quantificazione della dinamica spazio-temporale idromorfologica in termini di:

1. habitat fluviali, **indicatori 1, 2 e 3**;
2. aree allagabili, **indicatori 3 e 4**;
3. alveo attivo, **indicatori 4 e 5**.

Questa Relazione descrive le attività svolte nella terza e ultima fase di lavoro, che va da febbraio 2019 a dicembre 2019 (**Milestone M3**; **Figura 1**), e i risultati in essa conseguiti sintetizzabili come segue:

- Finalizzazione del classificatore delle macro-unità morfologiche SUM da dati S2 e sua applicazione alla serie storica dei dati S2 disponibili nel sistema LaViSam di ISPRA lungo tutto il corridoio fluviale dei corsi d'acqua analizzati (limitatamente ai *tile* utilizzati; v. [§2.2](#)), al fine di testare le potenzialità per l'applicazione a scala di bacino. *Questi risultati hanno permesso di contribuire alle Task 3.2, 3.3, 4.1, 4.3 e 5.2 del "Piano delle Attività" e allo sviluppo degli indicatori 1, 3, 4 e 5.*
- Finalizzazione del classificatore da dati S1 per l'identificazione dell'alveo bagnato (macro-unità "unità sommerse") e applicazione a una serie storica dei dati S1 lungo tutto il corridoio fluviale dei corsi d'acqua analizzati. L'applicazione non è stata effettuata sul fiume Paglia (una delle aree target), poiché i risultati della validazione riportati nella seconda Relazione tecnica intermedia hanno evidenziato che il suo canale bagnato ha dimensioni spaziali troppo piccole per essere rilevabili da S1. *Questi risultati hanno permesso di contribuire alle Task 3.1, 3.2, 3.3 e 5.1 del "Piano delle Attività" e allo sviluppo degli indicatori 1, 3 e 4.*
- Analisi della correlazione delle bande spettrali di S2 con la granulometria media delle barre di sedimento osservate da drone nei corsi d'acqua analizzati. *Questi risultati hanno permesso di contribuire alla Task 4.2 del "Piano delle Attività" e allo sviluppo dell'indicatore 2.*
- Analisi della correlazione di coerenza e intensità derivanti da dati radar di S1 con i cambiamenti morfologici (topografici) rilevati dalle acquisizioni sequenziali da drone. In particolare, il lavoro si è concentrato sulla barra del fiume Po (una delle aree target) nella quale tra marzo e giugno 2018 sono avvenuti processi d'alveo significativi che hanno creato zone di deposito ed erosione superiori al metro. *Questi risultati hanno permesso di contribuire alla Task 4.3 del "Piano delle Attività" e allo sviluppo dell'indicatore 5.*

Tabella 1 – Lista degli indicatori oggetto dell'accordo, con indicazione dei dati di campo/di base e dei dati Copernicus Sentinel utilizzati. Legenda: DEM, *Digital Elevation Model*; GPS, *Global Positioning System*.

#	Nome	Scopo principale	Dati di campo / di base	Dati Sentinel
Indicatore 1	Assemblaggio unità morfologiche	Mappatura habitat (macro-unità SUM)	Drone (mappatura habitat + DEM) + GPS	Sentinel-1 + 2
Indicatore 2	Classi granulometriche	Caratterizzazione substrato	Drone ( <i>photosieving</i> )	Sentinel-2
Indicatore 3	Larghezza alveo bagnato	Stima portata	<i>Spectral Water Index</i> da immagini ottiche S2; dati di portata	Sentinel-1 + 2
Indicatore 4	Larghezza alveo di piena ( <i>bankfull</i> )	Delineazione larghezza alveo di piena	Drone (DEM + mappatura habitat) + GPS + dati di portata	Sentinel-1 + 2
Indicatore 5	Indicatori di processo	Indicatori di dinamica morfologica	Drone ( <i>DEM of Difference</i> ) + GPS	Sentinel-1 + 2

Tutte le Task previste dal "Piano delle Attività" riportate nel Gantt in [Figura 1](#) e nel diagramma di flusso in [Figura 2](#) sono state concluse. Le attività condotte hanno mostrato che alcuni degli indicatori sviluppati che utilizzano i dati Sentinel sono maturi per un'eventuale futura implementazione per il monitoraggio idromorfologico alla scala nazionale (per esempio l'indicatore 1 per l'assemblaggio delle macro-unità morfologiche da Sentinel 2), mentre altri indicatori necessitano di ulteriori fasi di sviluppo e ricerca (per esempio l'indicatore 5 di dinamica morfologica da S1). Per la presente relazione si è deciso di adottare uno schema organizzativo che descrive uno per uno ciascuno dei 5 indicatori e i relativi prodotti generati ([Tabella 1](#)). Ciò in virtù del fatto che tali indicatori rappresentano distinti attributi chiave per il monitoraggio idromorfologico. Per ogni indicatore sono descritti la metodologia proposta, i codici sviluppati, i software impiegati e i dati utilizzati. Per questi ultimi si fa riferimento alla Relazione tecnica intermedia n.2 (M2), in cui sono descritti i dati di verità a terra e i risultati dei test condotti sui prototipi sviluppati per



i classificatori da dati S1 e S2 per le macro-unità morfologiche. La Relazione contiene inoltre un capitolo finale di discussione dedicato ai limiti e alle opportunità per l'implementazione e il calcolo di questi indicatori alla scala nazionale.

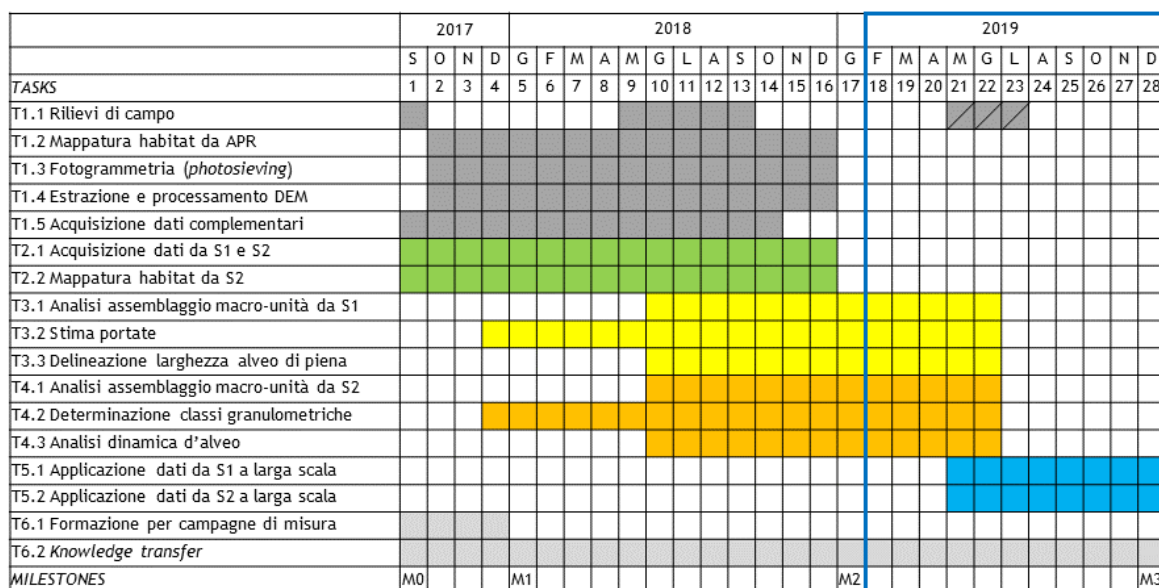


Figura 1 – Diagramma di Gantt delle attività previste. Legenda: APR, aeromobile a pilotaggio remoto; DEM, Digital Elevation Model; S1, Sentinel-1; S2, Sentinel-2. Milestone: M0, piano delle attività; M1, Relazione tecnica intermedia n. 1; M2, Relazione tecnica intermedia n. 2; M3, Relazione tecnica finale. Il riquadro blu si riferisce alle attività svolte nell'ultima fase del progetto e che sono descritte nella presente Relazione tecnica finale.

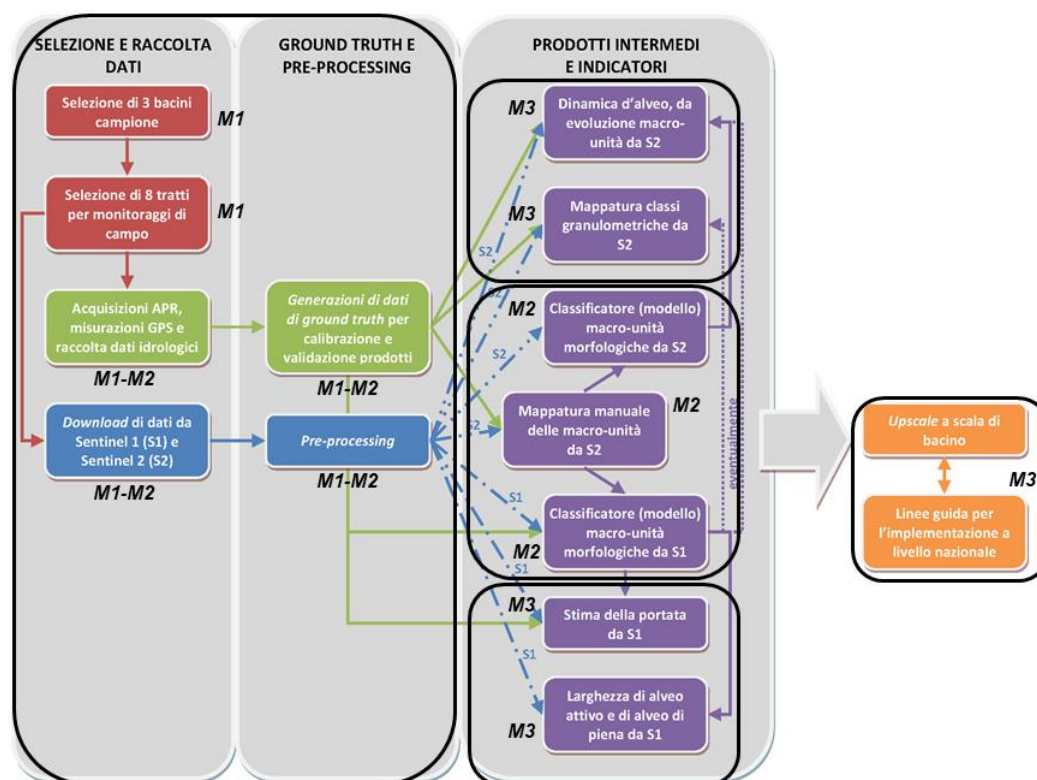


Figura 2 – Diagramma di flusso delle attività del presente accordo così come definite nel Work Package “Morfologia fluviale” della Convenzione ASI-ISPRA “Habitat Mapping” (Fonte: Deliverable n. 16 “Requisiti di Sistema”). Nei riquadri neri sono comprese ed evidenziate le attività svolte e i relativi prodotti ottenuti nelle varie fasi del progetto, inclusi i prodotti descritti nelle Relazioni tecniche intermedie corrispondenti alle Milestone M1 e M2 e i prodotti descritti nella presente Relazione tecnica finale corrispondenti alla Milestone M3.

Come previsto dall'accordo (T6.2), anche nel corso dell'ultimo anno di progetto sono state svolte le attività di *knowledge transfer* delle metodologie e dei prodotti generati attraverso n. 3 incontri presso la sede ISPRA di Roma (1 febbraio, 23-24 maggio e 25-26 novembre 2019), e numerosi scambi informativi da remoto mediante web conference, colloqui telefonici ed e-mail.

Inoltre, a integrazione dei rilievi di campo previsti nel Gantt di progetto, sono state condotte due campagne di misura mediante acquisizioni da drone e rilievi GPS sui tratti di studio dei fiumi Po e Sesia (Distretto idrografico del fiume Po) in data 13-14 settembre 2019 e sul tratto di studio del fiume Tagliamento (Distretto idrografico delle Alpi Orientali; area target comune della **Convenzione Operativa ASI-ISPRA "Habitat Mapping"**) in data 18-19 settembre 2019. I dati così rilevati saranno utilizzati nell'ambito della proroga della **Convenzione Operativa ASI-ISPRA** per testare ulteriormente i classificatori e supportare eventuali sviluppi futuri, anche in ambito di ricerca e servizio per il protocollo IDRAIM, delle metodologie e dei prodotti generati all'interno del presente accordo (in particolare per gli indicatori 2 e 5).

## 2 Assemblaggio macro-unità morfologiche SUM e loro traiettoria storica: indicatore 1

L'indicatore 1 riguarda l'estrazione delle macro-unità morfologiche SUM classificate all'interno del corridoio fluviale a partire dai dati S2 e S1, che costituiscono la base dati a supporto del calcolo degli altri indicatori (v. §2.3). Si tratta delle seguenti macro-unità: le unità in alveo sommerse (alveo di magra), le unità in alveo emerse (ad es., barre di sedimento, canali emersi, sponde non vegetate), la vegetazione in alveo e ripariale.

Il capitolo è strutturato nelle seguenti sezioni:

- una prima sezione (v. §2.1) descrive il classificatore da dati S2;
- una seconda sezione (v. §2.2) descrive l'applicazione del classificatore da dati S2 alla serie storica per l'estrazione di informazioni a supporto dell'indicatore 1 (assemblaggio macro-unità morfologiche);
- una terza sezione (v. §2.3) descrive l'algoritmo utilizzato per derivare le unità sommerse da dati S1.

### 2.1 Classificatore macro-unità morfologiche basato su dati S2

La mappatura delle macro-unità morfologiche SUM da dati S2 richiede che vengano seguiti diversi passi metodologici che qui riassumiamo:

- Rilievi di campo con drone e GPS di precisione e successivo processamento dei dati, inclusa fotogrammetria, per la produzione della verità a terra (Task da T1.1 a T1.5) e acquisizione e processamento dati da S2 (Task T2.1 e T2.2). Queste task sono state descritte nella Relazione tecnica intermedia n. 2.
- Creazione manuale della maschera del corridoio fluviale per fotointerpretazione su *Google Earth* (o eventualmente a partire da ortofoto georiferite recenti).
- Sviluppo e calibrazione di un classificatore basato sui dati multispettrali di S2 tramite tecniche di *machine learning* basandosi sulla verità a terra prodotta tramite i rilievi di campo (approccio *supervised classification*).
- Applicazione del classificatore alla serie storica di dati di S2 limitatamente al corridoio fluviale dei corsi d'acqua d'interesse (all'interno dei bacini dei fiumi Po, Sesia, Paglia-Tevere e della fiumara Bonamico), per il periodo che va da novembre 2015 a ottobre 2019. I dati di S2 elaborati per i *tile* di interesse sono stati acquisiti tramite il sistema LaViSam di ISPRA, nell'ambito del Work Package 3000 di "Habitat Mapping". Le attività di *pre-processing* del dato satellitare di S2, tra cui la correzione atmosferica, la mascheratura dei pixel con nuvole e ombre e la geocodifica (o georeferenziazione), sono state effettuate da ISPRA in coerenza con le specifiche tecniche definite nell'ambito della **Convenzione Operativa ASI-ISPRA "Habitat Mapping"**.
- Generazione di *raster* atti a descrivere nel tempo le traiettorie di evoluzione delle macro-unità morfologiche.

Le metodologie utilizzate per lo sviluppo del classificatore S2 sono state descritte e discusse in dettaglio nella Relazione tecnica intermedia n.2. In quest'ultimo anno di progetto il codice è stato ulteriormente sviluppato, migliorato e implementato come toolbox nel sistema LaViSam. Inoltre, è stata effettuata una nuova validazione della sua accuratezza sia con i dati acquisiti con il drone che con i dati derivati dall'analisi delle immagini S2 mediante fotointerpretazione. L'ulteriore validazione è dovuta all'implementazione del prototipo di classificatore sul LaViSam. A seguito di tale implementazione, è stato difatti possibile utilizzare come input al classificatore i dati di Sentinel-2 L2A presenti sul *repository* del LaViSam scaricati dal Theia

Data Hub, dati la cui correzione atmosferica mediante l'algoritmo MAJA<sup>1</sup> è migliore rispetto a quella presente nei dati scaricati dall'Hub Copernicus, precedentemente utilizzati per la validazione descritta nella Relazione tecnica intermedia n. 2.

Nella sezione [2.1.2](#) verranno descritti il procedimento utilizzato per la nuova calibrazione e validazione e i risultati ottenuti. Per quanto concerne la documentazione tecnica a supporto dell'utilizzazione del toolbox, è stato prodotto uno specifico allegato digitale in formato HTML, disponibile sulla piattaforma LaViSam, a cui si rimanda per ogni ulteriore dettaglio. L'allegato contiene una descrizione della struttura del *repository* di progetto creato all'interno del server ISPRA, la documentazione sulle funzionalità dei diversi script che compongono il toolbox e alcuni esempi di utilizzo per l'applicazione del classificatore e per il calcolo degli indicatori descritti in questa Relazione. La guida è stata utilizzata anche come strumento informativo e formativo durante gli incontri di *knowledge transfer* (T6.2).

### 2.1.1 Creazione della maschera del corridoio fluviale

La maschera del corridoio fluviale per ciascun tratto analizzato è stata digitalizzata manualmente in ambiente GIS (*Geographic Information System*) mediante fotointerpretazione di immagini del TMS (*Tile Map Service*) di *Google Satellite* disponibili per QGIS (immagini di marzo 2018) e verificando ulteriori aggiornamenti (ad esempio, erosioni di sponda post-2018) con un'immagine RGB ottenuta da S2 e acquisita nel luglio 2019.

Si ricorda che per **corridoio fluviale** si intende quella zona relativamente naturale, generalmente occupata da vegetazione spontanea, che include il cosiddetto **alveo attivo**, cioè la parte dell'alveo fluviale regolarmente rimodellata dalle piene (comprese le barre di sedimento e l'alveo di magra), più, ove presenti, le **isole di vegetazione** e la **fascia di vegetazione ripariale** che è parte della pianura alluvionale (incluse la piana inondabile, i terrazzi recenti, ecc.).

Per la delimitazione della maschera del corridoio fluviale si è inoltre tenuto conto del vettoriale del fondo valle (**pianura alluvionale**) ottenuto tramite toolbox *Fluvial Corridor* (Roux et al., 2015) usando il DEM a 20 m disponibile a scala nazionale (<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/dem20/view>), al fine di escludere versanti o terrazzi antichi dal corridoio stesso.

### 2.1.2 Calibrazione e validazione del classificatore S2

Il classificatore S2 mira a identificare all'interno della maschera del corridoio fluviale precedentemente generata le seguenti macro-unità morfologiche: unità sommerse; unità emerse; vegetazione in alveo e ripariale. I dati di verità a terra su cui è stato calibrato il classificatore S2 sono composti da due distinti dataset:

1. il **dataset drone** generato dalle acquisizioni da drone su otto siti (18 tratti fluviali campione) per ciascuno dei quali sono state effettuate almeno due campagne di misura tra settembre 2017 e ottobre 2018. Per maggiori informazioni sulla tipologia delle macro-unità SUM classificate e sul processamento dei dati da drone per ottenere la verità a terra si rimanda ai capitoli "Creazione del dataset per la verità a terra (Task 1)" e "Classificazione macro-unità da Sentinel-2 (Task 2.2 e in parte T4.1)" della Relazione tecnica intermedia n. 2. I *raster* classificati a partire da tali dati sono stati ricampionati ad una risoluzione 10 m x 10 m e associati (co-registrati) alle rispettive acquisizioni S2 presenti sul LaViSam;
2. il **dataset RGB-S2** generato da un'attività di classificazione manuale svolta dall'operatore (via fotointerpretazione) sulla base dell'informazione restituita dall'immagine RGB a 10 m derivata dalle bande 2, 3 e 4 di S2, volta a delimitare aree a cui è possibile attribuire senza dubbi di interpretazione

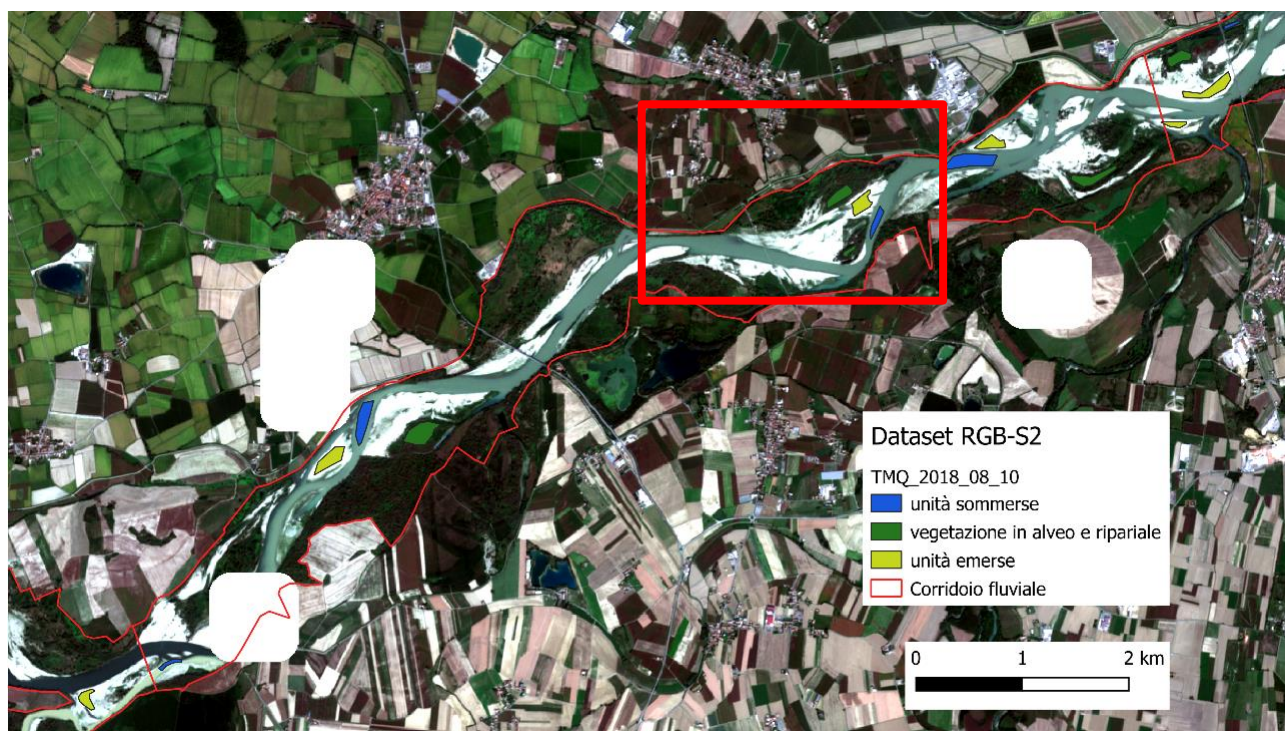
---

<sup>1</sup> MACCS (Multi-sensor Atmospheric Correction and Cloud Screening)-ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction) Joint Algorithm (Lonjou et al., 2016).

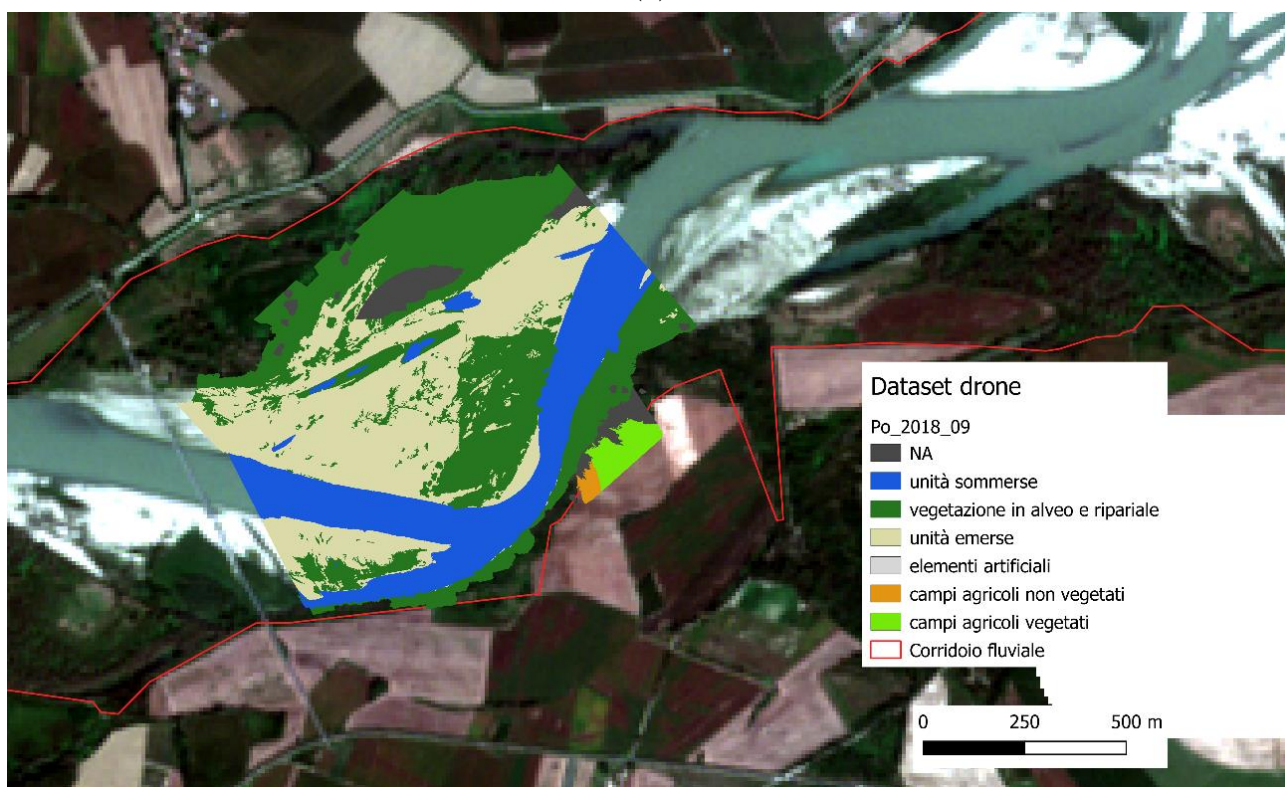
un'unica classe, pertanto definita “pura” (si veda ad esempio [Figura 3](#)). Si tratta di un'attività tradizionale per calibrare un classificatore “*supervised*” basato su informazioni multispettrali, molto utilizzata in particolare per classificare i dati satellitari, e che può essere eseguita “da scrivania” senza bisogno di recarsi in campo. Questo dataset è stato creato utilizzando le immagini S2 riferite alle date di acquisizione riportate in [Tabella 2](#), in corrispondenza delle quali le immagini sono caratterizzate da una scarsa presenza di nuvole lungo il corridoio fluviale.

L'informazione contenuta nel dataset RGB-S2, riguardando tutto il corridoio fluviale e non solo i tratti fluviali di campionamento, è in termini di numero di pixel di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella del dataset drone per cui consente al classificatore di generare correlazioni più robuste tra l'unità da classificare e l'informazione spettrale a disposizione. Allo stesso tempo questa informazione è tuttavia meno ricca di quella contenuta nel dataset drone poiché si basa sul campionamento delle sole classi “pure” identificabili in modo univoco dall'operatore sulla base delle immagini RGB (si veda [Figura 3a](#)). Questo significa che tutti i pixel 10 m x 10 m che contengono classi miste non sono stati presi in considerazione nel campionamento manuale: si pensi ad esempio a tutte le zone di confine tra due macro-unità morfologiche di tipologia distinta. All'opposto, la verità a terra da drone, ottenuta a partire da classificazione per fotointerpretazione di ortofoto a 10 cm ricampionata a 10 m utilizzando il criterio della classe più frequente all'interno dell'area di 100 m<sup>2</sup>, sebbene inferiore di un ordine di grandezza in termini di numero di pixel considerati (coprendo un'area limitata, che è quella del tratto campione), classifica in modo continuo i tratti di fiume (si veda, ad es., [Figura 3b](#)). Pertanto, questi dataset condizionano in varia misura la fase di calibrazione e di validazione del classificatore.





(a)



(b)

Figura 3 – Esempio dei dataset di calibrazione e validazione utilizzati come verità a terra: (a) immagine Sentinel-2 RGB a 10 m e poligoni classificati (dataset RGB-S2; agosto 2018); (b) classificazione da drone delle macro-unità per il sito del Po (dataset drone; settembre 2019). L'immagine in (b) riporta il dettaglio della zona evidenziata dal rettangolo rosso in (a); come sfondo si è tenuta la stessa RGB da S2.

Tabella 2 – Date delle acquisizioni S2 utilizzate per creare il dataset RGB-S2 di verità a terra.

Fiume	Data	S2 Tile	Fiume	Data	S2 Tile
Bonamico	set-17	T33SWC_20170922T094934_S2A	Po	mar-18	T32TMQ_20180313T102540_S2A
Bonamico	ott-17	T33SWC_20171012T094720_S2A	Po	apr-18	T32TMQ_20180430T103520_S2B
Bonamico	ott-17	T33SWC_20171022T094438_S2A	Po	mag-18	T32TMQ_20180512T102148_S2A
Bonamico	dic-17	T33SWC_20171231T094638_S2A	Po	lug-18	T32TMQ_20180729T103019_S2B
Bonamico	gen-18	T33SWC_20180105T094407_S2B	Po	ago-18	T32TMQ_20180810T102023_S2A
Bonamico	gen-18	T33SWC_20180125T094331_S2B	Po	ago-18	T32TMQ_20180828T103013_S2B
Bonamico	feb-18	T33SWC_20180214T094808_S2B	Po	set-18	T32TMQ_20180909T102205_S2A
Bonamico	mar-18	T33SWC_20180311T094844_S2A	Po	set-18	T32TMQ_20180927T103016_S2B
Bonamico	mar-18	T33SWC_20180316T094045_S2B	Sesia	set-17	T32TMR_20170927T103018_S2A
Bonamico	apr-18	T33SWC_20180420T094644_S2A	Sesia	nov-17	T32TMR_20171101T103144_S2B
Bonamico	mag-18	T33SWC_20180520T114459_S2A	Sesia	dic-17	T32TMR_20171213T102656_S2A
Bonamico	lug-18	T33SWC_20180714T140504_S2B	Sesia	gen-18	T32TMR_20180130T103517_S2B
Bonamico	ago-18	T33SWC_20180813T152841_S2B	Sesia	feb-18	T32TMR_20180211T102559_S2A
Bonamico	ago-18	T33SWC_20180818T094700_S2A	Sesia	mar-18	T32TMR_20180313T102540_S2A
Bonamico	set-18	T33SWC_20180907T094643_S2A	Sesia	apr-18	T32TMR_20180430T103520_S2B
Bonamico	set-18	T33SWC_20180912T162914_S2B	Sesia	mag-18	T32TMR_20180512T102148_S2A
Po	ott-17	T32TMQ_20171019T102055_S2B	Sesia	lug-18	T32TMR_20180711T102024_S2A
Po	nov-17	T32TMQ_20171101T103144_S2B	Sesia	ago-18	T32TMR_20180810T102023_S2A
Po	dic-17	T32TMQ_20171213T102656_S2A	Sesia	ago-18	T32TMR_20180828T103013_S2B
Po	gen-18	T32TMQ_20180130T103517_S2B	Sesia	set-18	T32TMR_20180909T102205_S2A
Po	feb-18	T32TMQ_20180211T102559_S2A	Sesia	set-18	T32TMR_20180927T103016_S2B

Sono stati realizzati diversi esperimenti per la taratura del modello per il classificatore, riepilogati in [Tabella 3](#): i) modello 1 è calibrato con il dataset drone e validato con il dataset RGB-S2; ii) modello 2 calibrato con il dataset RGB-S2 e validato con il dataset drone; iii) modello 3 in cui i dataset drone e RGB-S2 sono stati integrati e in cui è stata fatta una validazione mediante una *k-fold cross-validation*; iv) modello 4 in cui il dataset drone è stato diviso in due parti, ossia il 50% è stato utilizzato in taratura assieme al dataset RGB-S2, mentre il restante 50% è stato utilizzato in validazione; v) modello 5, infine, in cui viene utilizzato in taratura il 50% del dataset drone e il 95% del dataset RGB-S2, componendo il set di validazione con i restanti dati, in modo che i dati del dataset drone siano in misura uguale ai dati del dataset RGB-S2. L'algoritmo di classificazione utilizzato è del tipo *Random Forest Classifier*. In particolare, sono state utilizzate le librerie con licenza libera di *machine learning Scikit-learn* (<https://scikit-learn.org/stable/>) disponibili in ambiente Python (per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo “Classificatore S2” della Relazione tecnica intermedia n. 2).

Come proposto nella Relazione tecnica intermedia n. 2, per la valutazione della precisione dei modelli di classificatore sono stati impiegati i seguenti indicatori statistici: *Precision*, *Recall* e *f1-score*. I risultati dei test di calibrazione e validazione in termini di metriche *micro-average* e *macro-average*<sup>2</sup> sono riportati nella [Tabella 3](#). Dai risultati si evince chiaramente che quando si utilizzano per la validazione classi “pure” del dataset RGB-S2, come nel caso dei modelli 2 e 3 del classificatore (per quest'ultimo i dati dal dataset

<sup>2</sup> La *macro-average* calcola l'indice per ogni classe e ne prende la media, pesando le classi allo stesso modo. La *micro-average* considera invece il contributo di tutte le classi e ne calcola la media.



RGB-S2 costituiscono circa il 90% dell'intero dataset considerato), i risultati in validazione riportano prestazioni superiori a 0.9, dando così la sensazione di aver generato un classificatore quasi perfetto. Questa accuratezza è "ridimensionata" quando il classificatore viene validato con il dataset drone (si veda in particolare il caso del modello 1) che contiene le tre macro-unità SUM derivate anche da pixel misti. Infatti, come precedentemente riportato, tale dataset è basato sulla classificazione (manuale) dell'intera area coperta dalle acquisizioni nei 18 tratti fluviali considerati e sulla successiva ricampionatura a 10 m, nella quale i pixel misti vengono risolti mediante assegnazione della classe più frequente. Quanto detto spiega perché il modello 1 di classificatore generi invece un *f1-score* di poco superiore a 0.8 in termini di *micro-average*. Negli esperimenti 4 e 5, utilizzando metà del dataset drone in calibrazione e l'altra metà in validazione, si ottiene una prestazione intermedia rispetto agli esperimenti precedenti, con punteggi degli indicatori di precisione corrispondenti rispettivamente a 0.87 e 0.94 in termini di *micro-average*. Per quanto riguarda la *micro-average* delle metriche considerate, si può pertanto affermare che questi risultati forniscono la stima più realistica (limite inferiore) della precisione ottenibile classificando con risoluzione spaziale di 10 m le macro-unità morfologiche oggetto di studio. È infatti verosimile che circa 10-15% dei pixel a 10 m x 10 m contenga almeno due classi e quindi generi errori difficilmente eliminabili se il modello classifica solo tre macro-unità. Un'alternativa sarebbe quella di creare un modello che classifichi anche i pixel misti, creando quindi più classi di (macro-)unità morfologiche. Questa attività è tuttavia al di fuori del presente accordo tecnico-scientifico, sebbene sia già da ora individuata come possibile sviluppo futuro di questi classificatori (si veda anche il [Capitolo 5](#)).

Per l'applicazione del classificatore a tutta la serie storica di S2 si è deciso di utilizzare il modello ottenuto dall'esperimento 5, al fine di impiegare sia nella fase di calibrazione che in quella di validazione in modo equo sia i dati RGB-S2 che i dati drone. La [Figura 4](#) mostra l'importanza relativa di ogni banda di S2 (predittore) nel modello 5 di classificatore. L'indice utilizzato è il *Mean Decrease Impurity* (MDI, Louppe et al. 2013) che calcola per ogni predittore quanti nodi utilizzano tale predittore per compiere una scelta, è normalizzato sul numero di campioni che vengono classificati. Più è alto, più la variabile banda è importante nel modello. I risultati riportati sono leggermente diversi rispetto a quanto contenuto nella Relazione tecnica intermedia n. 2, poiché nella presente Relazione sono analizzate insieme tutte le bande ricampionate a 10 m, mentre nella precedente le bande a 10 m e quelle a 20 m erano state analizzate separatamente. In sostanza, si evince che le bande nell'infrarosso (B11 e B12 dello SWIR) sono le più importanti. Questo è coerente con il fatto che l'infrarosso aiuta a distinguere in particolare l'acqua che ha bassi valori di riflettanza su queste lunghezze d'onda rispetto al resto delle classi. Altri predittori risultati significativi sono le bande nel visibile, in particolare quella del blu (B2).

**Tabella 3 – Risultati dei vari esperimenti di calibrazione e validazione condotti utilizzando i dataset di verità a terra drone e RGB S2.**

#	Nome	Descrizione	N. Pixel Validazione	Precision micro/macro avg	Recall micro/macro avg	f1-score micro/macro avg
1	<i>s2cal</i>	Calibrazione: RGB-S2 Validazione: Drone	59257	0.82 / 0.78	0.82 / 0.76	0.81 / 0.76
2	<i>uascal</i>	Calibrazione: Drone Validazione: RGB-S2	643878	0.91 / 0.90	0.91 / 0.93	0.91 / 0.91
3	<i>allcal</i>	Calibrazione: (Drone + RGB-S2) (80%) Validazione: (Drone + RGB-S2) (20%)	140627 <sup>3</sup>	0.99 / 0.99	0.99 / 0.99	0.99 / 0.99
4	<i>uas50cal</i>	Calibrazione: Drone (50%) + RGB-S2 Validazione: Drone (50%)	29628	0.87 / 0.86	0.87 / 0.83	0.87 / 0.84
5	<i>uas50s295cal</i>	Calibrazione: Drone (50%) + RGB-S2 (95%) Validazione: Drone (50%) + RGB-S2 (5%)	61821	0.94 / 0.94	0.94 / 0.93	0.94 / 0.93

<sup>3</sup> Per l'esperimento *allcal* le prestazioni sono medie rispetto a 5 esperimenti di calibrazione/validazione eseguiti prendendo ogni volta un 20% diverso del dataset per validare (*k-fold cross-validation* con *n-fold* = 5).



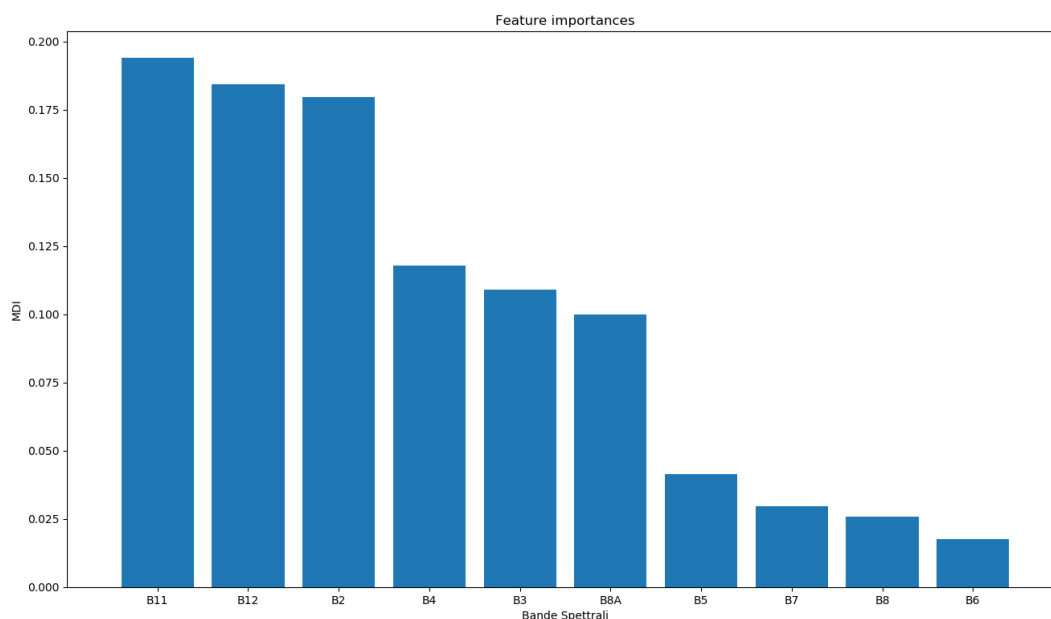


Figura 4 – Importanza relativa delle bande S2 per il modello 5 di classificatore S2.

In conclusione, per il classificatore proposto, gli errori di classificazione sono da ritenersi localizzati soprattutto nelle zone di confine tra le unità (per esempio tra unità sommerse ed emerse) o in pixel dove il segnale è misto, per esempio una barra di sedimenti (unità emersa) caratterizzata da vegetazione sparsa. Questi risultati indicano che l'attività di campo con il drone è fondamentale per due ragioni: i) per creare dataset di validazione (statisticamente) robusti e di dettaglio, che permettano di avere una stima realistica della precisione del classificatore; ii) per meglio calibrare il modello con l'informazione relativa ai pixel misti; si vede infatti che il modello 1 (calibrato senza dati drone ma validato su dati drone) ha le *performance* più basse tra tutti gli esperimenti. Inoltre, le ortofoto a 10 cm generate a partire da acquisizioni da drone permettono di esplorare la possibilità di creare modelli di classificazione delle unità morfologiche di maggior dettaglio rispetto alle tre macro-unità SUM proposte, che includano anche le classi miste (ad esempio, le barre alte rispetto alle semplici barre di sedimento, si vedano Rinaldi et al., 2015, 2016b; si veda anche il [Capitolo 5](#)).

## 2.2 Applicazione del classificatore alla serie storica di dati S2 per la generazione di indici e *raster* delle macro-unità morfologiche

Il *repository* di dati satellitari disponibile nel LaViSam di ISPRA e utilizzato dal progetto IRIS contiene la serie storica di dati S2 dal 2015 al 2019, pre-processati tramite il software MAJA (v. [§2.1](#)) e ricampionati a 10 m per tutte le bande spettrali.

Per le finalità del progetto, il classificatore S2 è stato applicato a tutte le date disponibili nella serie storica archiviata sul LaViSam da novembre 2015 a ottobre 2019. Le macro-unità morfologiche sono state classificate all'interno della maschera corrispondente al **corridoio fluviale** (v. [§2.1.1](#)) lungo i corsi d'acqua a cui appartengono i tratti fluviali acquisiti tramite drone (v. [Figura 5](#)) ed è limitata all'estensione dei 4 *tile* utilizzati (2 per il Po e il Sesia, 1 per il Paglia e 1 per la fiumara Bonamico).

I **corridoi fluviali** sono stati successivamente **suddivisi in tratti morfologicamente omogenei**, secondo il protocollo IDRAIM, al fine di procedere all'estrazione e all'analisi degli indicatori idromorfologici a partire dalle mappe S2 prodotte (v. [Capitolo 3](#)). Nello specifico, per la suddivisione in tratti morfologicamente omogenei (Rinaldi et al., 2016a) si è tenuto conto di: variazioni nella larghezza della pianura alluvionale

(Step 2 – Confinamento); cambiamenti della morfologia dell'alveo (Step 3 – Morfologia dell'alveo); presenza di affluenti maggiori o opere (Step 4 – Altre discontinuità).

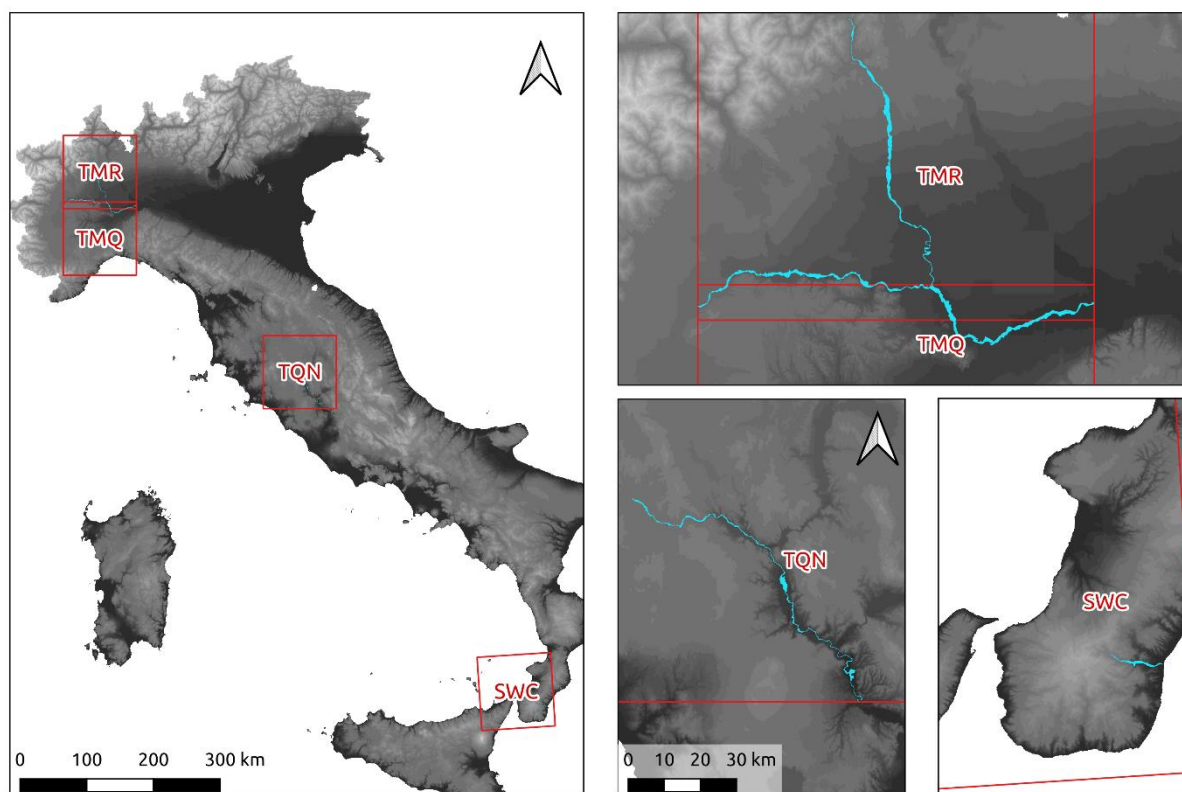


Figura 5 – Tile e corridoi fluviali di applicazione del classificatore S2.

Sono quindi state create in output mappe *raster* che riportano, su ciascun tratto di corridoio fluviale e per ogni data disponibile della serie storica di S2, le macro-unità “unità sommerse”, “unità emerse” e “vegetazione in alveo e ripariale” (vedi, ad es., [Figura 6](#)). Inoltre, allo stesso modo, sono state create mappe *raster* di frequenza per ogni macro-unità (si veda, ad es., [Figura 7](#)).

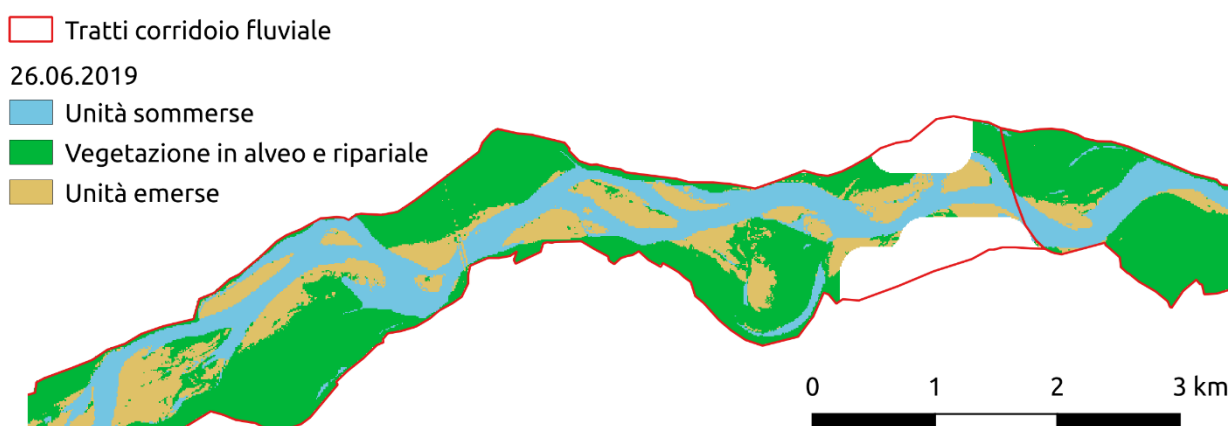


Figura 6 – Risultato classificazione in data 26/06/2019 per un tratto del fiume Po. Le aree mancanti (pixel bianchi) mostrano le zone coperte da nuvole. In celeste le unità in alveo sommerse, in verde la vegetazione in alveo e ripariale e in marrone chiaro le unità in alveo emerse.

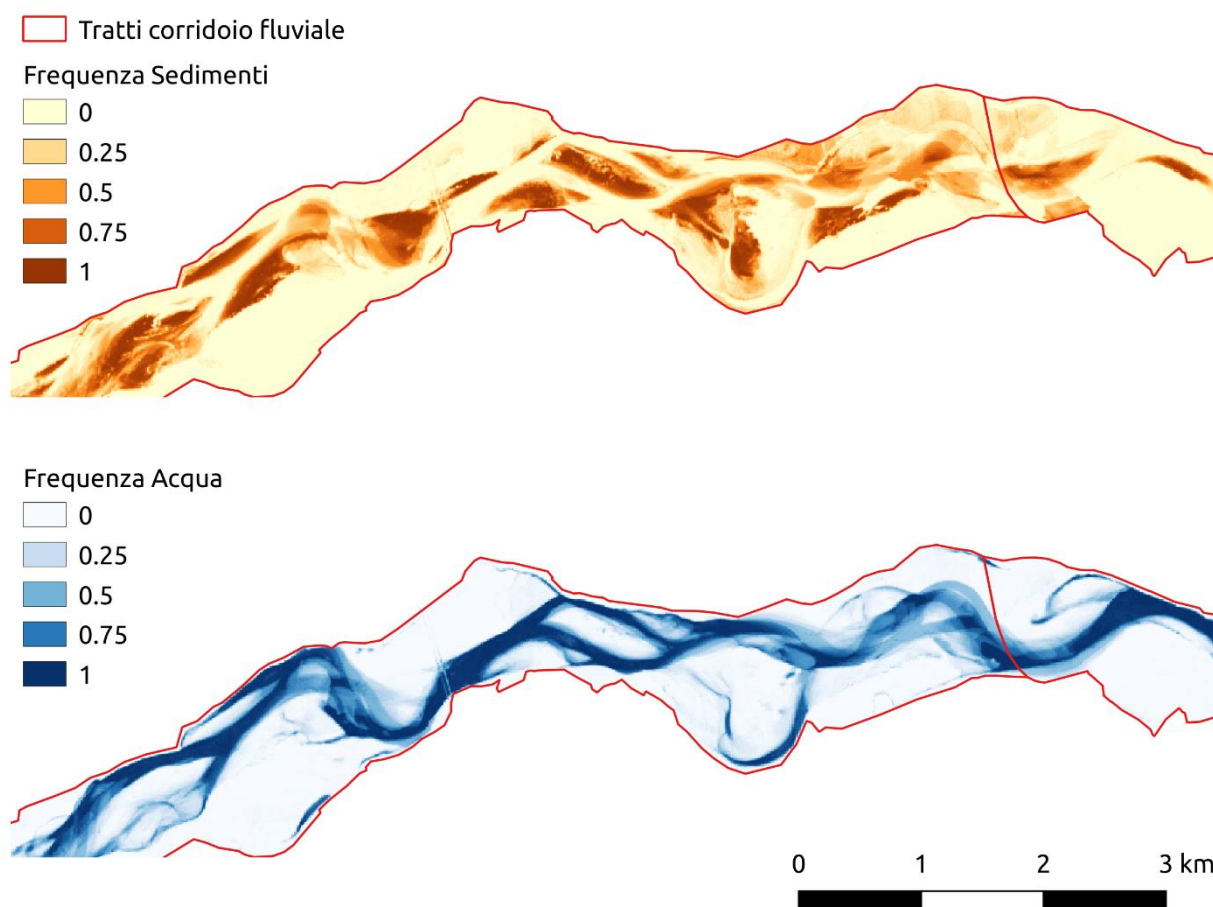


Figura 7 – Mappa di frequenza mediata per mese per unità emerse (alto) e sommerse (basso). La frequenza è normalizzata tra zero e uno.

L'informazione di frequenza è stata calcolata secondo due modalità distinte:

1. *occurrence*: ottenuta considerando, per ogni pixel, il rapporto tra la frequenza di osservazione di ogni singola classe e il totale delle osservazioni disponibili per il pixel stesso;
2. *occurrence-monthly*: ottenuta come valor medio dell'*occurrence* calcolata per ogni mese dell'anno, in modo tale da tenere conto della stagionalità.

In [Figura 8](#) sono riportati due esempi derivati dall'impiego delle due modalità di calcolo delle frequenze, per i quali non è possibile apprezzare delle differenze significative (in media si è calcolata una differenza < 1%). Tuttavia, si ritiene che la frequenza mediata per mese possa avere il vantaggio di pesare in modo più uniforme la stagionalità, mentre l'altra potrebbe sottostimare significativamente alcuni periodi dell'anno in cui le immagini da S2 sono scarse o assenti, quali ad esempio i periodi piovosi invernali o autunnali dove le nubi non permettono acquisizioni utili ai fini della classificazione.

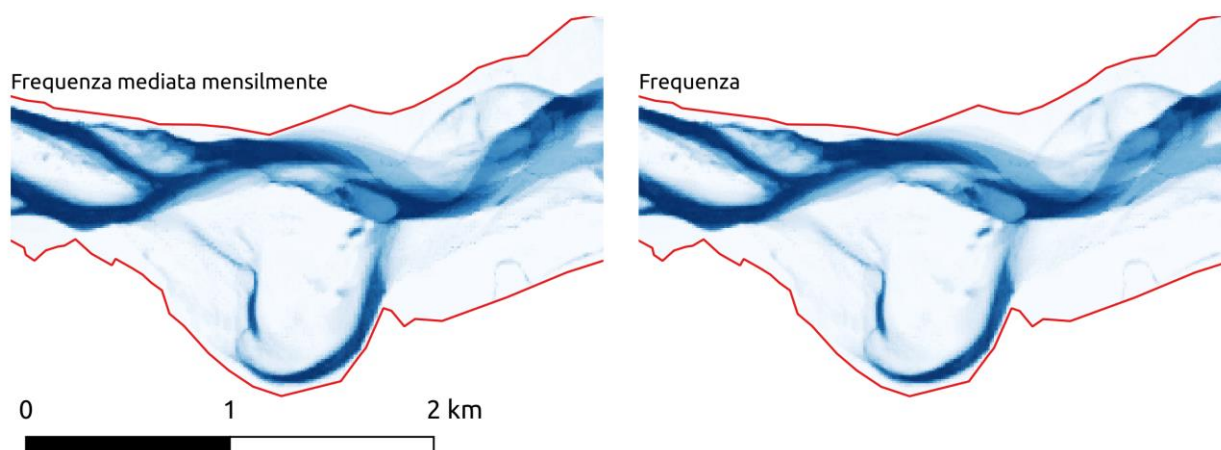


Figura 8 – Mappa di frequenza mediata per mese (sinistra) e pura (destra).

Gli algoritmi sviluppati permettono, inoltre, di generare mappe di frequenza per una specifica finestra temporale definita dall'utilizzatore (per maggiori dettagli si rimanda all'allegato digitale).

I *raster* di frequenza delle macro-unità così prodotti rappresentano un'informazione utile a rispondere alle esigenze dell'indicatore 1 relativo all'assemblaggio delle macro-unità morfologiche ([Tabella 1](#)) e all'analisi delle loro traiettorie spaziali e temporali, così come una base di supporto per l'estrazione e interpretazione degli altri indicatori (soprattutto gli indicatori 3, 4 e 5; v. [§2.3](#)).

### 2.3 Classificatore macro-unità “unità sommerse” basato su dati S1

Nella precedente Relazione tecnica intermedia n. 2 era stato introdotto il toolbox STORM che permette di classificare le unità sommerse (ossia acqua) da dati S1. Il toolbox STORM è costituito da un insieme di funzioni di MATLAB che consente in maniera automatizzata, a partire dai dati SAR S1, di ottenere la relativa classificazione binaria delle unità sommerse nel sistema di riferimento di preferenza, anziché in geometria RADAR (range, azimuth). L'algoritmo di classificazione implementato in STORM si basa sulla differenza tra le *Probability Density Function* (PDF) tra i valori di *backscatter* generati dal meccanismo di *scattering single bounce*, che avviene su una superficie elettromagneticamente liscia come l'acqua, e gli altri meccanismi associati a superfici non lisce. Attraverso delle trasformazioni dell'immagine, viene massimizzata la separabilità tra le due distribuzioni e individuata quindi la soglia attraverso cui l'immagine è binarizzata. Nell'arco del 2019 il toolbox è stato ulteriormente sviluppato per poter essere applicato alla serie storica di dati S1 scaricata dall'hub del programma EU Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), pur mantenendo inalterato il suo fondamento metodologico e tecnico. Per quanto concerne la descrizione degli script sviluppati e una guida all'applicazione del toolbox si rimanda all'allegato digitale della presente Relazione.

In questa sezione saranno invece analizzate le *performance* del toolbox anche in funzione delle informazioni sulle unità sommerse già utilizzate per la validazione del classificatore S2, provenienti dal dataset drone e dal dataset RGB-S2. Infatti, per le date riportate in [Tabella 2](#), sono disponibili acquisizioni sia con S2 che con S1. Ne consegue la possibilità di utilizzare il dataset RGB-S2 per validare la classificazione delle unità sommerse ottenuta con STORM sulle acquisizioni da S1. L'algoritmo è stato applicato sui *tile* corrispondenti alle zone dei fiumi Po, Sesia e della fiumara Bonamico, per l'arco temporale che va da settembre 2017 a settembre 2018.

L'applicazione dell'algoritmo di classificazione implementato in STORM sull'arco temporale considerato e a scala di bacino ha evidenziato alcune problematiche non emerse durante il primo ciclo di validazione,



poiché questo era stato applicato su regioni spaziali di estensione più ridotta, dell'ordine di grandezza delle aree acquisite da drone. L'aumento della dimensione dell'area da classificare ha generato in alcune occasioni errori di classificazione laddove una delle due classi (acqua / non acqua) predominava sull'altra.

In [Figura 9](#) è riportata la zona di applicazione per i fiumi Sesia e Po con due esempi: il primo (a sinistra) di corretta classificazione corrispondente alla data del 29/09/2017 e il secondo (a destra) di errata classificazione, corrispondente alla data del 02/09/2017, in cui, soprattutto nella zona in basso a destra, si può apprezzare una erronea predominanza della classe unità-sommerse (acqua).



Figura 9 – Esempio di classificazione andata a buon fine (sx) e con cattiva convergenza (dx).

Questa criticità può essere compresa rifacendosi al principio teorico di funzionamento dell'algoritmo di classificazione illustrato nella Relazione tecnica intermedia n. 2, di seguito riassunto. Le immagini di ampiezza in input all'algoritmo sono trasformate in un opportuno dominio, tale che la *Probability Density Function* (PDF) dei pixel appartenenti alla "classe positiva" (unità sommerse, ovvero acqua) sia il più possibile separata da quella dei pixel appartenenti alla "classe negativa" (non acqua). In tale dominio trasformato è quindi possibile "binarizzare" l'intera immagine mediante un singolo valore di soglia (cosa che non sarebbe altrimenti possibile con l'immagine originale nel dominio dell'ampiezza). Per determinare questa funzione di trasformazione si suddivide il *dynamic range* (ovvero l'intervallo determinato dal valore minimo e massimo di ampiezza) dell'immagine in input in sotto-intervalli radiometrici (v. il paragrafo "Algoritmo per la classificazione dell'area bagnata" della Relazione tecnica intermedia n. 2). Viene quindi stimato per ogni sotto-intervallo radiometrico una PDF attraverso i pixel appartenenti al vicinato del dato sotto-intervallo. Infine, si calcola la funzione di trasformazione semplicemente come il massimo inviluppo di tutte le PDF stimate. Una conseguenza di questa procedura è che una variazione delle dimensioni dell'area da classificare condiziona la stima di queste PDF. In particolare, le proprietà radiometriche dell'acqua possono variare significativamente all'interno di un'area di grandi dimensioni; per questo è possibile che al crescere delle dimensioni dell'area diventi più difficile l'identificazione di un valore di soglia univoco per discernere classi positive e negative. Un esempio è riportato in [Figura 10](#) dove, per le date mostrate in [Figura 9](#), sono riportati il numero di pixel corrispondenti per ogni intervallo della PDF di massimo inviluppo. Come già discusso nella Relazione tecnica intermedia n. 2 (sezione "Algoritmo per la classificazione dell'area bagnata"), se l'acqua ha proprietà radiometriche omogenee nell'area di applicazione, la soglia è ben individuabile (istogramma a sinistra di [Figura 10](#)), altrimenti quando questo non avviene (istogramma a destra di [Figura 10](#)), la binarizzazione viene resa meno efficace per la indisponibilità di una chiara soglia di separazione tra le classi acqua e non-acqua (v. immagine a destra di [Figura 9](#)).

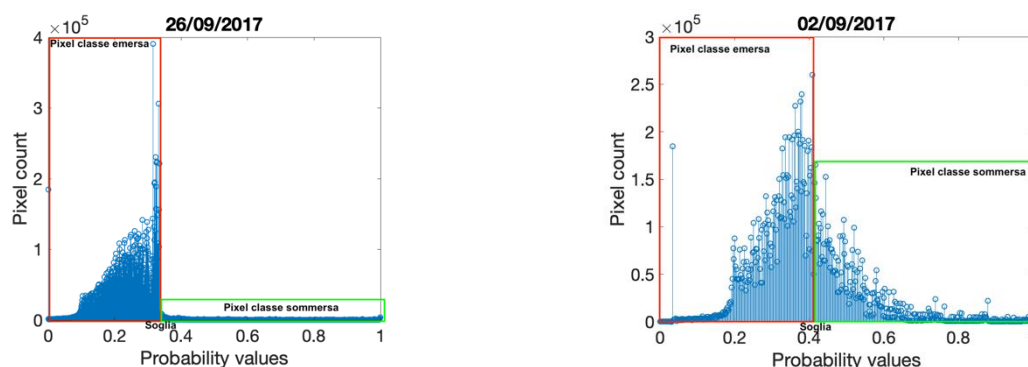


Figura 10 – Esempio dell’istogramma dell’immagine nel dominio trasformato con soglia ben individuabile (grafico a sinistra) e non (grafico a destra).

Analizzando tutta la serie temporale di immagini S1 disponibili sui fiumi Po e Sesia, si è constatato che per 10 delle 55 acquisizioni utili il classificatore non ha funzionato correttamente. Pertanto tali acquisizioni sono state escluse dal computo delle metriche di validazione (v. [Tabella 4](#)). Per quanto concerne il caso studio della fiumara Bonamico, l’applicazione a scala di bacino ha confermato quanto era già emerso nella precedente applicazione (vedi paragrafo “limiti generali” della Relazione tecnica intermedia n. 2). Questo corso d’acqua ha un canale bagnato di larghezza inferiore ai 20 m per la quasi totalità delle acquisizioni nella serie temporale studiata, e pertanto non visibile da S1 con questo algoritmo che richiede, per una corretta applicazione, una larghezza di almeno 50 m. Infatti, limitate dimensioni del canale bagnato comportano un numero di pixel della classe unità sommerse non sufficiente per la stima delle PDF mediante la procedura discussa precedentemente.

Tabella 4 – Elenco delle acquisizioni sul bacino del Po e Sesia con esito dell’algoritmo di classificazione.

ID [piattaforma_dd_mm_yyyy]	Idonea [Si/No]
S1B02092017	Si
S1B14092017	No
S1B26092017	Si
S1B08102017	Si
S1B20102017	Si
S1B01112017	Si
S1B13112017	Si
S1A19112017	Si
S1B25112017	Si
S1A01122017	Si
S1B07122017	Si
S1A13122017	No
S1B19122017	Si
S1A25122017	Si
S1B31122017	Si
S1A06012018	Si
S1B12012018	Si
S1A18012018	Si
S1B24012018	Si
S1A30012018	Si
S1B05022018	Si
S1B17022018	Si
S1A23022018	Si
S1A07032018	Si

ID [piattaforma_dd_mm_yyyy]	Idonea [Si/No]
S1B13032018	Si
S1A19032018	No
S1B25032018	No
S1A31032018	Si
S1B06042018	Si
S1A12042018	Si
S1A24042018	No
S1B30042018	No
S1A06052018	Si
S1B12052018	No
S1A18052018	Si
S1B24052018	Si
S1A30052018	Si
S1B05062018	Si
S1A11062018	Si
S1B17062018	Si
S1A23062018	No
S1A05072018	Si
S1B11072018	Si
S1A17072018	Si
S1B23072018	Si
S1A29072018	Si
S1B04082018	Si
S1A10082018	Si
S1B16082018	Si
S1A22082018	Si
S1B28082018	Si
S1A03092018	Si
S1B09092018	No
S1A15092018	Si
S1B21092018	No

Per le date in cui l'algoritmo ha consentito la stima robusta delle soglie di separazione tra le classi acqua e non-acqua (v. [Figura 10](#) a sinistra) sono state calcolate le metriche di *performance* della classificazione, analogamente a quanto fatto per i dati S2. La [Tabella 5](#) riporta i risultati della validazione effettuata usando i dataset RGB-S2 e drone per l'area del Po-Sesia (v. [Figura 9](#)). Per il dataset RGB-S2 si raggiungono precisioni superiori al 90%. È importante sottolineare che questa validazione include solo classi di unità sommerse "pure" e non miste, non contiene cioè zone di confine tra due unità (v. [§2.1.2](#)). I risultati della validazione cambiano quando riferiti al dataset drone. Il valore di *precision* per le unità sommerse è 0.74, non altissimo. Come già evidenziato nella Relazione tecnica intermedia n. 2, una debolezza comune a tutti gli approcci basati unicamente sulla radiometria dell'immagine (Henry et al., 2006; Matgen et al., 2011), è la generazione di falsi positivi sui terreni agricoli in concomitanza o a seguito di forti piogge o di irrigazione intensa. La ragione risiede nel fatto che per un sensore SAR, da un punto di vista puramente radiometrico, il meccanismo di *scattering* generato su queste superfici è uguale a quello generato da uno specchio d'acqua, pertanto i pixel apparterranno alla stessa distribuzione. Inoltre si riscontra un valore piuttosto alto di falsi negativi per le unità sommerse (*recall* 0.42). Questo mostra che l'algoritmo di classificazione da S1 tende a sottostimare l'area del canale bagnato. Un esempio è riportato in [Figura 11](#), in cui il canale bagnato ottenuto da S2 è in celeste e quello da S1 è in blu. Questa sotto-stima è probabilmente dovuta a un limite strutturale dell'algoritmo. In zone di confine tra unità emerse e sommerse, cioè tra sedimento e acqua, la presenza anche minima in un pixel S1 di "scatteratori forti", ossia oggetti

che generano una riflessione del segnale a “doppio rimbalzo” riflettendo l’onda emessa dal SAR di nuovo verso l’antenna (per esempio i sedimenti), predomina nel generare il segnale di *backscatter* rispetto alle superfici bagnate presenti nel pixel (Chini et al., 2017). Questo non succede per dati multispettrali come S2, dove pixel misti vengono classificati correttamente sulla base della predominanza spaziale di una classe rispetto all’altra nel pixel.

In sintesi, il classificatore per le unità sommerse da S1 mostra alcuni problemi nell’identificazione di soglie idonee alla classificazione e quindi non ha prodotto risultati idonei per circa il 20% della serie storica analizzata. Dove il classificatore funziona correttamente è stato invece osservato un problema di falsi positivi in zone a elevata umidità e una tendenza a sottostimare l’area del canale bagnato. Per una discussione sui futuri sviluppi di questa applicazione si rimanda al [Capitolo 5](#).

Tabella 5 – Valori di Precision, Recall e f1-score del classificatore S1 generati validando sul dataset RGB-S2 e sul dataset drone.

#	Precision	Recall	f1-score	N. pixel
Dataset RGB-S2				
Unità sommerse	0.98	0.83	0.90	67405
Unità emerse	0.90	0.99	0.95	112304
Micro Avg	0.93	0.93	0.93	179709
Macro avg	0.94	0.91	0.92	179709
Dataset Drone				
Unità sommerse	0.74	0.42	0.54	5708
Unità emerse	0.88	0.97	0.92	25504
Micro Avg	0.87	0.87	0.87	31212
Macro avg	0.81	0.70	0.73	31212



Figura 11 – Tratto 20 del Po (PO\_20), a valle della confluenza con il Sesia, in data 09/09/2018: confronto delle unità sommerse derivate da S2 (celeste) e da S1 (blu).



### 3 Estrazione di informazioni a partire dall'assemblaggio delle macro-unità morfologiche: indicatori 3, 4 e 5

Gli indicatori 3, 4 e 5 sono di seguito descritti all'interno dello stesso capitolo poiché sono generati dalla stessa tipologia di dati, ossia le macro-unità morfologiche SUM classificate all'interno del corridoio fluviale dai dati S2 e S1 così come descritto nel [Capitolo 2](#).

Il capitolo è così strutturato: le prime due sezioni mostrano come l'integrazione dei prodotti riguardanti le macro-unità "unità sommerse" (in questo capitolo anche chiamate "canale o alveo bagnato") ottenuti da S2 e S1 consenta di migliorare la mappatura e la caratterizzazione delle unità sommerse nello spazio, all'interno del corridoio fluviale, e nel tempo. Il [§3.1](#) mostra come questi prodotti siano correlati con l'informazione disponibile sulle portate (indicatore 3) mentre il [§3.2](#) mostra come tali prodotti supportino l'identificazione di superfici aggregate di rilevante significato morfologico, quali l'alveo di piena o l'alveo attivo (indicatore 4). Infine, il [§3.3](#) descrive lo sviluppo di indici per il calcolo dell'indicatore 5, ottenuti a partire dall'applicazione del classificatore S2 alla serie storica, al fine di ottenere la caratterizzazione della dinamica morfologica in termini di variazioni planimetriche.

#### 3.1 Indicatore 3: larghezza alveo bagnato e stima della portata

La letteratura recente ha mostrato come sia possibile calcolare da satellite le portate di alcuni fiumi di dimensioni medio-grandi su scala globale (Durand et al., 2016; Gleason and Smith, 2014). Il corretto funzionamento di tale procedimento necessita la misurazione della larghezza dell'alveo bagnato in più sezioni lungo un tratto fluviale di qualche km caratterizzato da sezioni relativamente omogenee (ossia, stessa tipologia fluviale). L'incertezza nella stima delle portate, in base alle applicazioni finora condotte e riportate in letteratura, è dell'ordine del 20÷30% e dipende fortemente dalla tipologia fluviale e dalle caratteristiche delle sezioni.

In questa sezione viene analizzata la correlazione tra portate e area delle unità sommerse mappate da S1 e S2 e viene testata la *performance* di alcuni modelli di predizione delle portate.

Le stazioni idrometriche utilizzate, situate lungo i fiumi Sesia e Po, sono quelle di Borgosesia, Pray Sessera, Palestro Sesia e Isola S. Antonio ([Figura 12](#)). La fiumara Bonamico non è stata analizzata perché non esistono dati sulle portate disponibili, mentre il fiume Paglia non è stato incluso nell'analisi perché le sue dimensioni spaziali (alveo bagnato < 50 m) non lo rendono adatto alla predizione della portata con pixel Sentinel superiori ai 100 m<sup>2</sup>.

Per le stazioni di Po e Sesia è stato possibile analizzare la correlazione tra la portata e l'area delle unità sommerse derivate da S2 nel periodo tra novembre 2015 e dicembre 2018 per 5 tratti, quattro sul Sesia (SE\_02, SE\_03, SE\_04 e SE\_10) e uno sul Po (PO\_12) ([Tabella 6](#)). I tratti SE\_02, SE\_10 e PO\_12 sono situati subito a valle delle rispettive stazioni idrometriche e sono tutti caratterizzati da una morfologia a canale singolo. I due tratti contigui SE\_03 e SE\_04 sono stati scelti al fine di confrontare un tratto a canale singolo (SE\_03) e uno a canali multipli (SE\_04). I dati di portata relativi a questi tratti sono stati desunti dalla somma delle portate relative a due stazioni di misura poste a monte dei due tratti, quelle di Borgosesia e Pray Sessera (quest'ultima situata lungo un tributario).

I dati di S1, relativi al periodo settembre 2017-settembre 2018, sono stati analizzati solo per i tratti di PO\_12 e SE\_10, poiché per gli altri tratti il canale bagnato ha dimensioni troppo ridotte per l'applicazione dell'algoritmo (< 50 m per gran parte dell'anno). Per i limiti dell'applicazione dell'algoritmo S1 si veda il capitolo precedente (v. [§2.3](#)) e la Relazione tecnica intermedia n. 2.

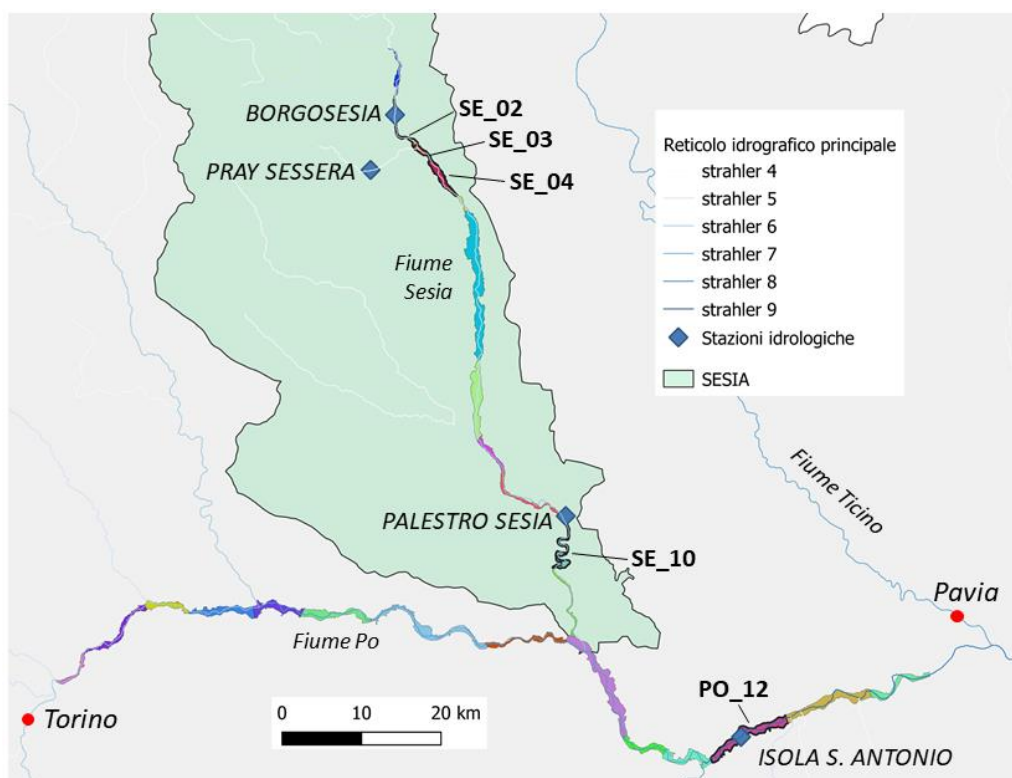


Figura 12 – Localizzazione delle stazioni idrometriche utilizzate lungo la rete idrografica gerarchizzata secondo la descrizione di Strahler e dei tratti analizzati per il calcolo dell'indicatore 3. Fiume Sesia: tratti SE\_02, SE\_03, SE\_04, SE\_10; Fiume Po: tratto PO\_12.

Tabella 6 – Tratti, tipologia di dati, stazioni idrometriche utilizzate e performance dei modelli di regressione area/portata generati. Legenda: CS, canale singolo; CM, canali multipli; MAE, errore assoluto medio.

Reach	Tipologia d'alveo	Stazione di misura	$Q_{media}$ campione	Dati	Numerosità campione	Var. Spiegata Calibrazione	Var. Spiegata Validazione	MAE	MAE/ $Q_{media}$ campione (%)
PO_12	CS	Isola S. Antonio	286	S2	66	0.71	0.79	62	21
PO_12	CS	Isola S. Antonio	386	S1	40	0.52	0.47	145	37
PO_12	CS	Isola S. Antonio	324	S2+S1	106	0.45	0.43	114	35
SE_10	CS	Palestro	37	S2	122	0.66	0.58	16	43
SE_10	CS	Palestro	54	S1	38	0.52	0.11	41	75
SE_10	CS	Palestro	41	S2+S1	160	0.29	0.57	23	56
SE_04	CM	Borgosesia + Pray Sessera	16	S2	138	0.61	0.62	8.19	51
SE_03	CS	Borgosesia + Pray Sessera	16	S2	139	0.30	0.50	10.51	65
SE_02	CS	Borgosesia	12	S2	122	0.43	0.57	7.49	62

Nel grafico di [Figura 13](#) sono riportati i valori di area delle unità sommerse in funzione dei dati di portata per i tratti PO\_12 e SE\_10. I punti blu corrispondono ai valori delle aree ottenuti da S2, per quel tratto, in ciascuna delle date disponibili e il loro diametro è inversamente proporzionale alla copertura nuvolosa presente nel tratto. I punti arancioni corrispondono a immagini S2 con copertura nuvolosa < 20%. Questi ultimi sono stati selezionati per testare il modello delle portate. I triangoli verdi corrispondono ai dati disponibili da S1. Dai grafici si evince che esiste un legame quasi logaritmico tra portate e aree delle unità sommerse per immagini con scarsa copertura nuvolosa (punti arancioni). Anche per i dati S1 esiste una buona correlazione positiva ma i dati hanno una maggiore variabilità probabilmente dovuta ai limiti dell'algoritmo S1 (v. [§2.3](#)). Inoltre, i dati S1 sono in numero minore poiché coprono un arco temporale più

ridotto. Allo stesso tempo, si noti che i dati S1 includono i periodi caratterizzati da portate maggiori, non presenti nel dataset da S2, verosimilmente a causa della presenza di nuvole in quelle date che impediscono l'utilizzo di dati da S2. L'analisi della correlazione tra portate e unità sommerse estratte da S2 mostra risultati molto simili anche per gli altri tratti (SE\_02, SE\_03 e SE\_04). Si conclude che una relazione tra unità sommerse e portate esiste per tutti i tratti, indipendentemente dalla morfologia. Per questa ragione, si è ritenuto opportuno testare le capacità di possibili modelli regressori di rappresentare questa relazione, al fine di quantificare le precisioni raggiungibili nel predire le portate a partire dalla mappatura del canale bagnato.

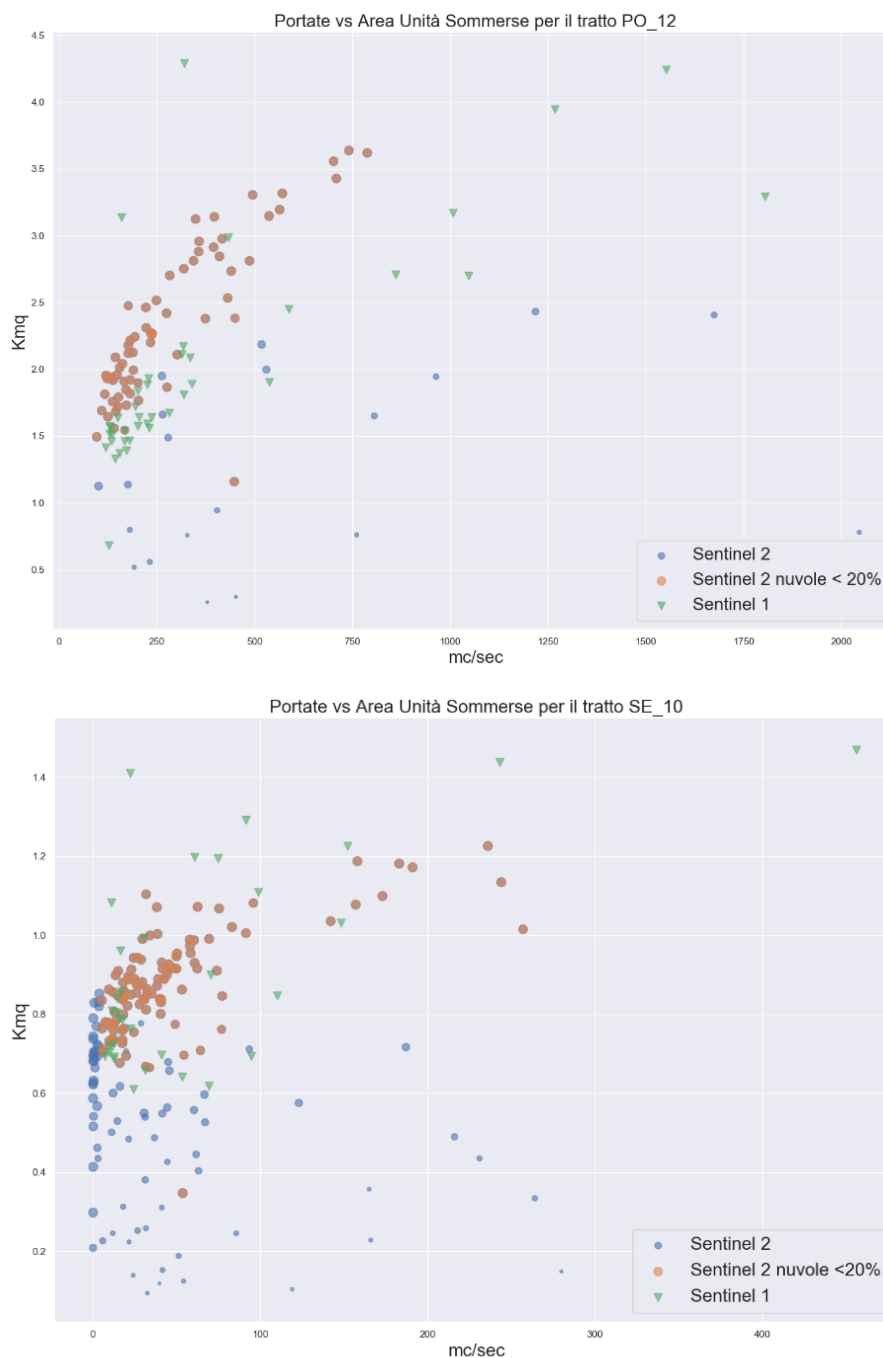


Figura 13 – Area delle macro-unità “unità sommerse” in funzione delle portate per i tratti PO\_12 (in alto) e SE\_10 (in basso): i punti blu corrispondono a tutte le date disponibili da S2 e il diametro del punto è inversamente proporzionale alla copertura nuvolosa; i punti arancioni corrispondono alle immagini S2 con copertura nuvolosa < 20%; i triangoli verdi corrispondono ai dati estratti da immagini S1.

Per ogni tratto è stato calibrato un modello di regressione, utilizzando un regressore robusto, lo *Huber Regressor* (dalle librerie Python di *machine learning* *scikit-learn*; <https://scikitlearn.org/stable/>). Si è scelto di non utilizzare algoritmi non parametrici, quali il *Random Forest*, perché più adatti quando la disponibilità di dati è maggiore. Per i tratti analizzati, le coppie portata-larghezza alveo, che costituiscono il campione, variano da un minimo di 38 (SE\_10 da S1) a un massimo di 139 (SE\_03 da S2) (v. [Tabella 6](#)). Algoritmi fortemente non lineari, come il *Random Forest* o le reti neurali, non possono venire calibrati adeguatamente in condizioni di scarsità di dati o possono soffrire con maggior facilità di problemi di *overfitting*. Per questa ragione, ed essendo l'intento quello di confrontare i modelli applicati ai vari tratti, si è quindi ritenuto più sicuro utilizzare un algoritmo di regressione lineare. La robustezza nella scelta del modello è verificata dai risultati in calibrazione e validazione riportati in [Tabella 6](#). È stato usato il 70% del dataset per calibrare e il 30% per validare ed è stato riportato il valore di varianza spiegata ottenuto, corrispondente a:

$$\left[ 1 - \frac{\text{var}(\text{osservato} - \text{predetto})}{\text{var}(\text{osservato})} \right]$$

I valori di varianza spiegata sono molto simili per tutti i tratti analizzati, sia in calibrazione che in validazione, potendo quindi escludere problemi di *overfitting*, e dimostrando che il tipo di relazione trovata dai vari modelli, anche quando la varianza spiegata è bassa (ossia, minore di 0.5), è stabile e generalizzabile. [Tabella 6](#) riporta anche l'errore assoluto medio (MAE, *mean absolute error*) che diviso per la portata media del campione fornisce una stima dell'errore medio percentuale sulla portata stimata.

I principali risultati ottenuti da questi esperimenti possono venire sintetizzati come segue:

- (i) Esiste un segnale chiaro che mostra come per portate crescenti (v.  $Q_{\text{media}}$  campione in [Tabella 6](#)), e quindi anche con aree di canale bagnato crescenti, il modello migliori le prestazioni. Infatti, le prestazioni migliori si hanno con il modello applicato ai dati S2 per il tratto PO\_12 ([Figura 14](#)) che ha valori di varianza spiegata di 0.71 in calibrazione, 0.79 in validazione. L'errore percentuale assoluto medio rispetto alla  $Q_{\text{media}}$  campione è del 21% (v. [Tabella 6](#)). Queste prestazioni sono paragonabili ai modelli proposti in letteratura per i grandi fiumi nel mondo, i quali hanno un'incertezza variabile nella stima delle portate dal 20 al 30%, a seconda dei fiumi e dei tratti analizzati (Gleason and Smith, 2014).
- (ii) Le prestazioni del modello peggiorano quando vengono usati i soli dati da S1. Questo potrebbe essere dovuto alla minor quantità di osservazioni disponibili e ai limiti attuali dell'algoritmo di classificazione da S1, precedentemente discussi.
- (iii) Rispetto al punto (i), diminuendo la larghezza del canale bagnato, e quindi per alvei di dimensioni minori, le prestazioni dei modelli peggiorano.
- (iv) Il modello del tratto SE\_04 (canali multipli) mostra prestazioni significativamente migliori rispetto al modello del tratto SE\_03 (canale singolo) nonostante stiano predicendo la stessa portata (il tratto SE\_03 si trova subito a monte del tratto SE\_04): per SE\_04 la varianza spiegata in validazione è di 0.62 (0.61 in calibrazione), mentre per SE\_03 il valore in validazione è di 0.50 (0.30 in calibrazione). Questo suggerisce che la tipologia dell'alveo può essere molto importante ai fini della predizione della portata: un tratto a canali multipli sembra più adatto all'applicazione di modelli di predizione della portata a partire da informazioni areali sul canale bagnato rispetto a un tratto a canale singolo, almeno per tratti aventi un alveo delle dimensioni paragonabili a quelle analizzate (< 50 m per la maggior parte dell'anno). Ciò probabilmente è dovuto al fatto che il tratto a canali multipli avendo una profondità minore (compensata da un numero maggiore di canali bagnati), registra anche una variazione dell'area bagnata più sensibile al variare delle portate.

- (v) Tutti i modelli (v. [Figura 14](#) per PO\_12 e SE\_10, ma ciò vale anche per i modelli non riportati ma disponibili nell'allegato digitale) sottostimano le portate maggiori. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che per le portate maggiori l'areale del canale bagnato cambia meno significativamente poiché l'incremento di portata viene in parte compensato da una maggiore velocità della corrente. Tuttavia, allo stato attuale questa rappresenta solo un'ipotesi che necessita maggiori approfondimenti.
- (vi) Infine, le portate maggiori sono soprattutto caratterizzate dalle immagini S1, come si evince dalla  $Q_{media}$  campione in [Tabella 6](#) e dai grafici in [Figura 13](#), dimostrando l'interesse di combinare, in futuro, le informazioni provenienti da dati S1 e S2, ai fini del monitoraggio idrologico a cadenza quasi settimanale.

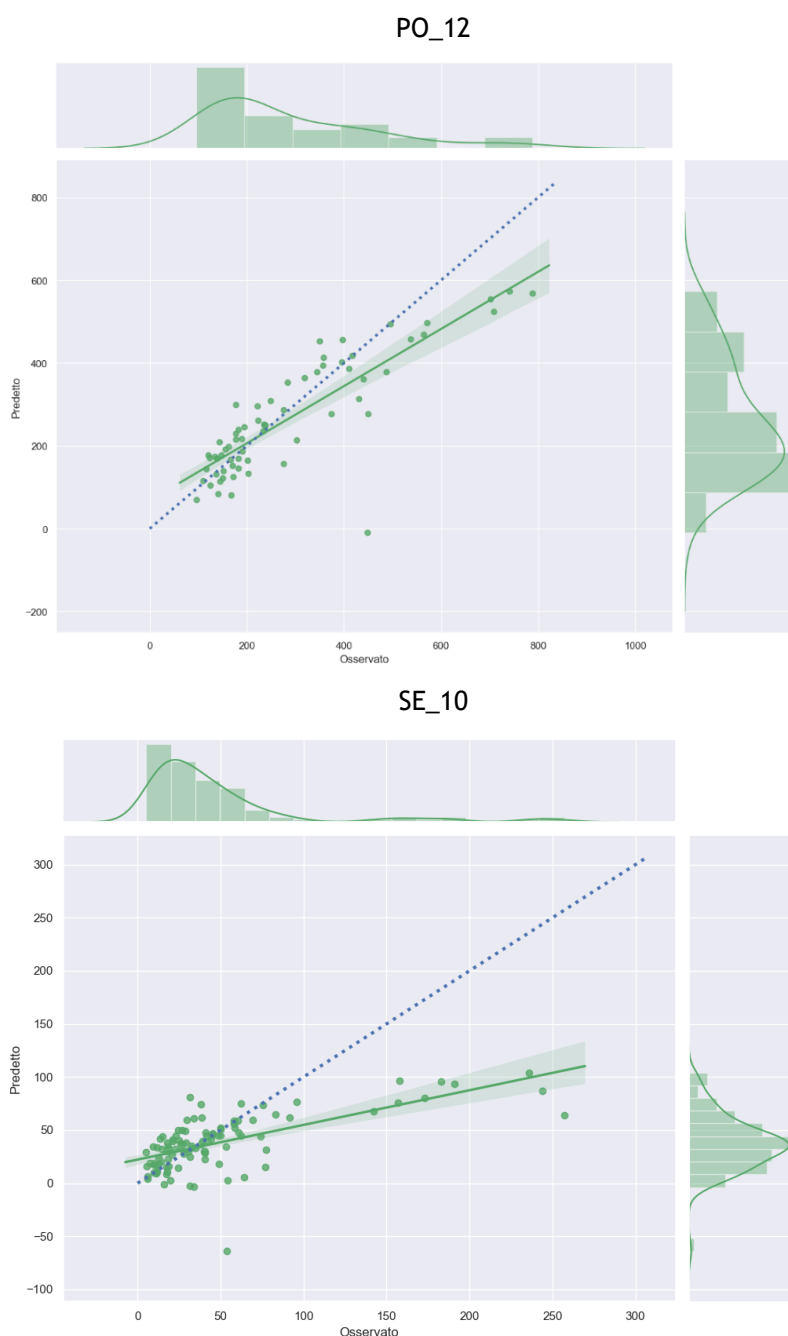


Figura 14 – Valori di portata predetti versus osservati per i modelli del PO\_12 (in alto) e del SE\_10 (in basso) ottenuti a partire da dati S2.

Da questi esperimenti si può quindi ipotizzare che è possibile ottenere una stima accurata delle portate da S2 e S1 solo per fiumi maggiori, come dimostrato per il tratto del Po analizzato, ovvero per fiumi con portate medie annue superiori ai 100-200 m<sup>3</sup>/s. Inoltre, questi risultati mostrano che la scelta della tipologia del tratto, canale singolo vs. canali multipli, sembra essere molto significativa ai fini della stima della portata a partire da dati areali del canale bagnato. Per una discussione sullo sviluppo futuro di queste applicazioni si rimanda al [Capitolo 5](#).

### 3.2 Indicatore 4: larghezza alveo di piena

Poter mappare le unità sommerse classificate da immagini S2 e S1 con cadenza settimanale o di poco superiore apre interessanti opportunità da esplorare per il monitoraggio idromorfologico. Per esempio, a partire dalle mappe *raster* di frequenza delle unità sommerse ottenute da S2, integrando l'informazione della frequenza di allagamento con quella relativa alla frequenza delle unità di vegetazione in alveo e ripariale e delle unità emerse ([§2.2](#)), è possibile sia individuare all'interno del corridoio fluviale l'**alveo di piena** (riferito anche come **alveo pieno**, **di piene rive** o **bankfull channel**), ossia la massima estensione delle unità sommerse che è associata alla portata che può essere contenuta in alveo senza il verificarsi di esondazione al di fuori delle sponde (Rinaldi et al., 2015, 2016b), sia ipotizzare l'estensione dell'**alveo attivo**, definito come la porzione di alveo dove ogni anno avvengono processi morfologici di erosione e deposizione. L'individuazione dell'alveo di piena e dell'alveo attivo necessita di stabilire delle opportune soglie di frequenza per le macro-unità che siano coerenti rispetto alle definizioni di queste superfici come riportate in letteratura (si veda Rinaldi et al., 2015, 2016b). Non esistendo ad oggi delle soglie quantitative a cui riferirsi per l'individuazione di tali superfici a partire da serie temporali di dati derivati da remoto, per lo scopo della presente relazione tali soglie sono state definite secondo giudizio esperto (geomorfologo), in seguito a una serie di test effettuati sui fiumi Po e Sesia. Nello specifico, in ambiente GIS sono stati sovrapposti i *raster* di frequenza delle macro-unità ("unità sommerse", "vegetazione in alveo e ripariale", "unità emerse") e testate diverse combinazioni di soglie tra di esse, supportate da fotointerpretazione delle immagini RGB di *Google Satellite* disponibili per QGIS (TMS, *Tile Map Service*; immagini di marzo 2018). Per quanto riguarda l'alveo di piena, si è cercato quindi di trovare una soglia di frequenza delle unità sommerse per la quale l'acqua non oltrepassasse mai le sponde (identificate in corrispondenza dei campi agricoli o della vegetazione ripariale lungo il corridoio fluviale), o comunque non occupasse mai delle superfici stabili, ossia escludendo le aree alle quali corrisponde una frequenza elevata delle unità di vegetazione (zone di vegetazione stabile come le isole o con sedimento fine visibile da immagini RGB). Per l'alveo attivo si è cercato invece di trovare una combinazione di soglie che includesse una superficie continua tra unità sommerse ed emerse lungo l'alveo bagnato alle quali corrispondesse una frequenza bassa di unità di vegetazione (ossia escludendo vegetazione arbustiva e arborea) e che escludesse le barre più alte (unità emerse per la maggior parte dell'arco temporale analizzato). Dopo una serie di tentativi, l'alveo di piena è stato individuato includendo tutti i pixel per i quali la frequenza della classe unità sommerse è superiore a 0.02, ai quali corrisponde generalmente, lungo i corridoi fluviali in esame, una frequenza della classe unità di vegetazione in alveo e ripariale inferiore a 0.2, ovvero che esclude tutti quei pixel caratterizzati da vegetazione stabile. L'alveo attivo è stato invece creato utilizzando tutti i pixel ai quali è associata una frequenza della classe unità sommerse superiore a 0.1, ai quali corrisponde, lungo i corridoi fluviali in esame, una frequenza della classe unità vegetazione in alveo e ripariale inferiore a 0.1 e escludendo i pixel per i quali la classe unità emerse ha una frequenza superiore a 0.8.

La [Figura 15](#) riporta un esempio di individuazione, a partire da immagini di S2, di alveo di piena e di alveo attivo in due tratti del fiume Sesia: il tratto SE\_06 a canali multipli con morfologia *wandering* e il tratto SE\_10 a canale singolo con morfologia meandriforme. Si noti come le soglie scelte per identificare le diverse superfici aggregate siano consistenti nei due tratti a configurazione morfologica differente. Abbassando ulteriormente la soglia di frequenza della classe unità sommerse al valore 0.001 si può invece



ipotizzare di individuare l'estensione della **piana inondabile** ([Figura 16](#)), ovvero quella superficie alluvionale piana, contigua all'alveo, generata da accrescimento laterale e verticale durante le attuali condizioni di regime (inondata con tempi di ritorno dell'ordine di 1÷3 anni; Rinaldi et al., 2016b).

Si sottolinea che i valori di frequenza delle macro-unità analizzati sono associati al numero di osservazioni disponibili, ossia circa una/due al mese per l'arco temporale analizzato. Pertanto, la sistematizzazione e generalizzazione ad altri corsi d'acqua delle soglie come definite sopra richiedono ulteriori test e approfondimenti che sono al di là degli obiettivi di questo accordo di collaborazione ISPRA-DEIB. Per esempio, se si avesse a disposizione un numero maggiore di osservazioni i limiti dell'alveo di piena come identificati in [Figura 15](#) (a sinistra) potrebbero essere più netti, o ancora, i canali secondari identificati come alveo attivo nel tratto SE\_06 (in [Figura 15](#) in alto a destra) potrebbero diventare connessi al canale principale.

Per una discussione sulle possibili future applicazioni e opportunità di queste informazioni si rimanda al [Capitolo 5](#).

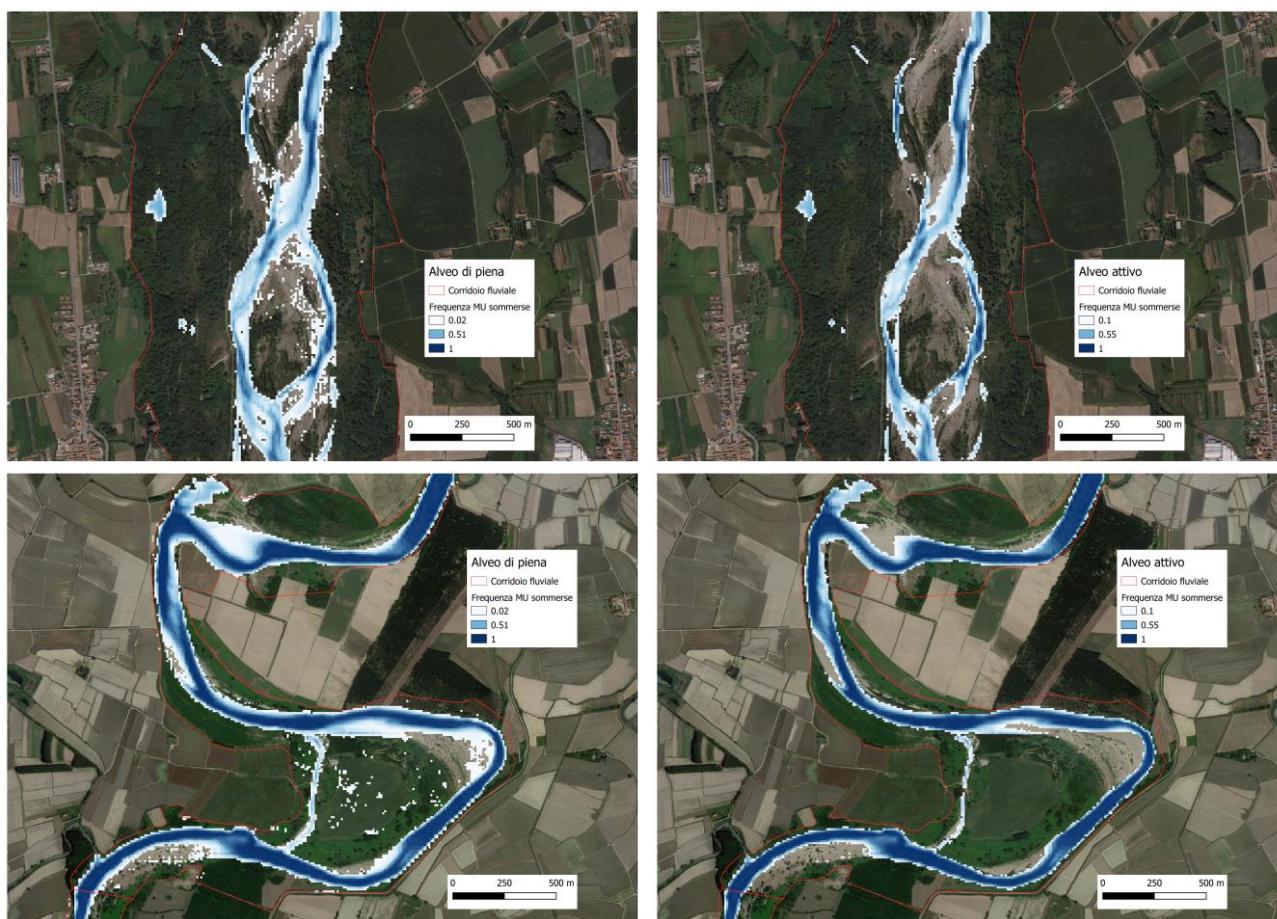


Figura 15 – Alveo di piena (sinistra) e alveo attivo (destra) individuati in due porzioni dei tratti SE\_06 (in alto) e SE\_10 (in basso) del fiume Sesia, rispettivamente a morfologia *wandering* e meandriforme. Le porzioni bagnate isolate possono corrispondere a: imprecisioni legate al numero di osservazioni disponibili (da escludere in fase di *post-processing*); pozze isolate in corrispondenza di canali secondari abbandonati; depressioni in corrispondenza di suolo a granulometria fine e impermeabile con persistenza di acqua (incluse pozzanghere).

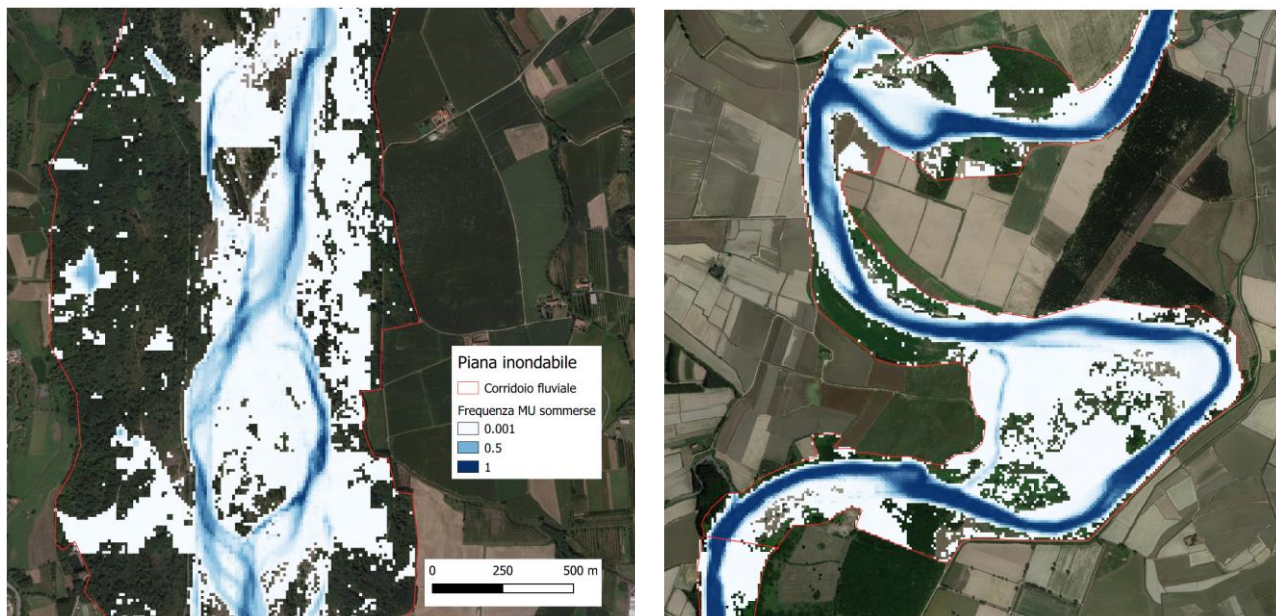


Figura 16 – Piana inondabile individuata in due porzioni dei tratti SE\_06 (sinistra) e SE\_10 (destra) del fiume Sesia, rispettivamente a morfologia *wandering* e meandriforme. Per le porzioni bagnate isolate valgono gli stessi commenti fatti per Figura 15.

### 3.3 Indicatore 5: indicatori di processo e dinamica morfologica (variazioni planimetriche)

Per ogni tratto di ciascun corridoio fluviale considerato sono stati sviluppati degli algoritmi di analisi applicati alle mappe prodotte dal classificatore S2 ([§2.2](#)), che consentono di aggregare e utilizzare le informazioni contenute nelle mappe stesse a supporto della caratterizzazione idromorfologica e della dinamica morfologica dei corsi d'acqua, in termini di variazioni planimetriche.

Un primo algoritmo produce un'elaborazione, riportata nel grafico in [Figura 17](#), che aggrega spazialmente e temporalmente il rapporto tra l'area occupata dal canale bagnato (unità sommerse) e quella occupata dall'insieme di canale bagnato e barre di sedimento (unità sommerse + unità emerse). Nel grafico sono riportate per il fiume Po i valori medi mensili di tale rapporto, compreso tra 0 e 1, avendo in ascissa i tratti fluviali da monte a valle e in ordinata i mesi del periodo considerato (dal meno recente al più recente, leggendo il grafico dal basso verso l'alto). Il valore 1 del rapporto (associato alla gradazione cromatica più chiara) corrisponde alla completa sommersione delle barre di sedimento, mentre il valore 0 (associato alla gradazione cromatica più scura) corrisponde alla totale assenza di acqua. Pertanto, leggendo le informazioni riportate nel grafico lungo l'asse delle ordinate per singolo tratto è possibile notare attraverso il gradiente cromatico l'effetto della stagionalità sul rapporto: colori più chiari corrispondono all'occorrenza di portate più elevate che allagando le barre di sedimento sottraggono area a esse; colori più scuri corrispondono a periodi di magra. Leggendo invece il grafico lungo l'asse delle ascisse per una singola data (o anche guardando all'insieme delle date per ciascun tratto rispetto agli altri) è possibile notare come il gradiente cromatico del rapporto fornisca informazioni utili a distinguere le varie tipologie fluviali. A conferma di ciò si veda, ad esempio, la [Figura 18](#) dove sono mostrate le ortofoto dei tratti PO\_07 e PO\_12 del fiume Po: il primo tratto, che è tipicamente a canale singolo caratterizzato dalla totale o quasi assenza di barre, ha valori alti del rapporto, mentre valori più bassi caratterizzano il secondo tratto, che è ricco di sedimenti con morfologia a canali multipli di tipo *wandering*.



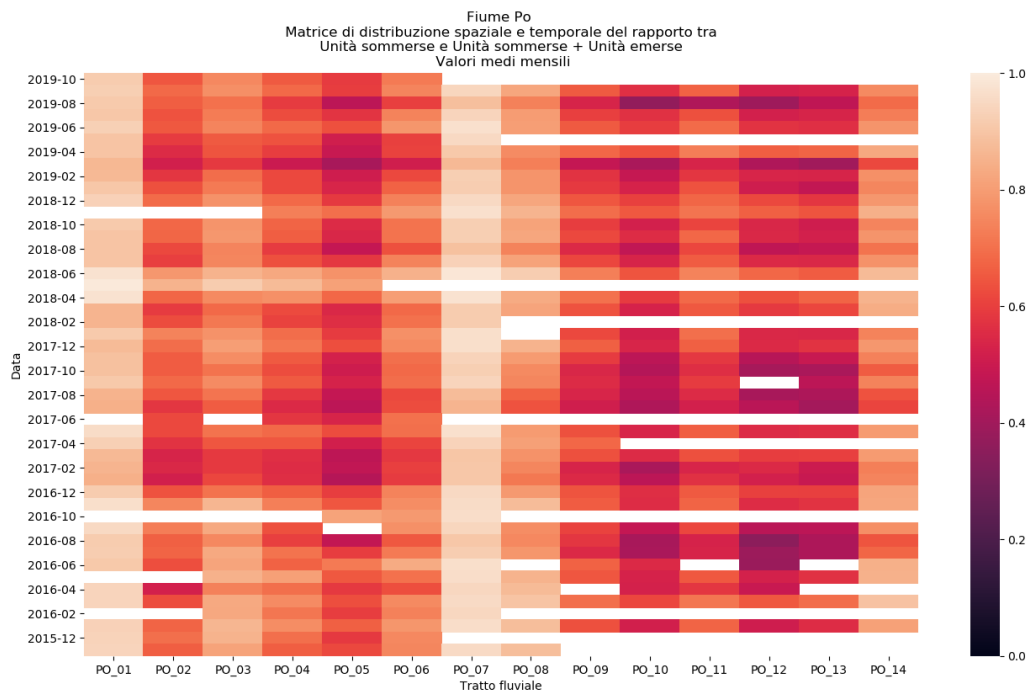
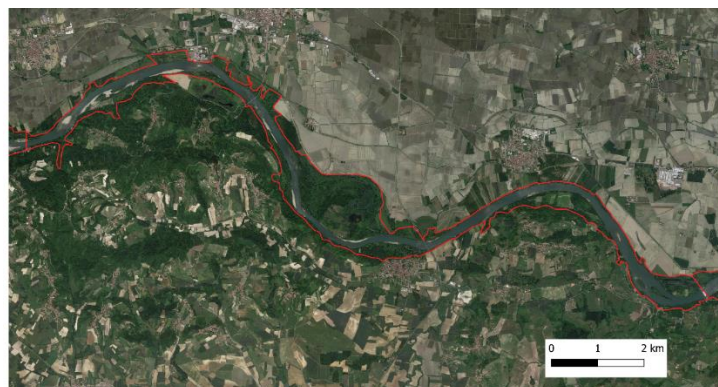
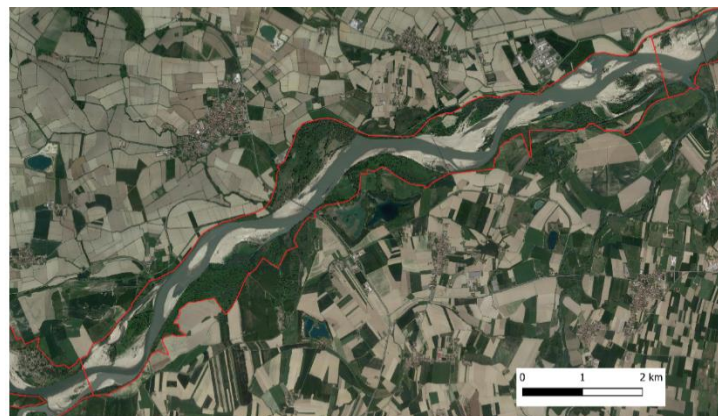


Figura 17 – Grafico del rapporto tra unità sommerse e unità sommerse + unità emerse per il fiume Po: in ascissa sono riportati i codici dei tratti fluviali da monte verso valle, mentre in ordinata sono riportati i mesi in cui viene calcolato il rapporto medio mensile.



(a)



(b)

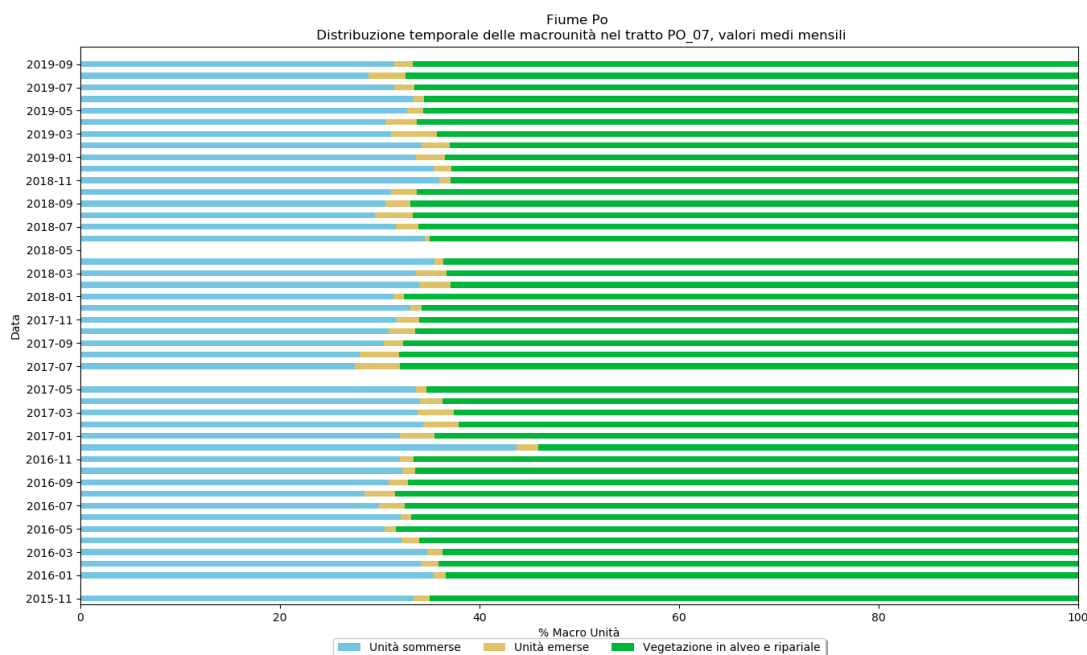
Figura 18 – Ortofoto dei tratti PO\_07 e PO\_12 del fiume Po (immagini TMS di Google Satellite disponibili per QGIS). Il tratto PO\_07 (a) è a canale singolo con poca presenza di barre, mentre il tratto PO\_12 (b) è a canali multipli di tipo *wandering*.

Il secondo algoritmo sviluppato produce un istogramma che per ogni tratto fluviale mostra come varia nel tempo la distribuzione delle tre macro-unità classificate. La distribuzione è calcolata in termini di valori medi mensili. In [Figura 19](#) sono riportati, a titolo esemplificativo, gli istogrammi relativi ai tratti PO\_07 e PO\_12, in cui si evidenzia la diversa distribuzione delle macro-unità morfologiche associata alle due tipologie fluviali.

Infine, è stato sviluppato un ulteriore algoritmo che produce un’elaborazione sintetica a scala di reticolo, attraverso una rappresentazione aggregata in falsi colori RGB, dei valori di frequenza calcolati come media mensile per l’insieme delle “unità sommerse” (banda blu), “unità emerse” (banda rossa) e “unità di vegetazione in alveo e ripariale” (banda verde). Questa rappresentazione fornisce una mappa media dell’assemblaggio delle macro-unità morfologiche che è il risultato dell’insieme dei processi idromorfologici avvenuti nell’arco temporale analizzato. In [Figura 20](#) è riportato a titolo d’esempio il risultato dell’applicazione dell’algoritmo ai fiumi Sesia e Po relativamente all’arco temporale tra novembre 2015 e ottobre 2019.

Le analisi delle traiettorie spaziali e temporali delle classificazioni così prodotte insieme ai *raster* di frequenza delle macro-unità (v. [§2.2](#)) e alle analisi presentate nelle sezioni precedenti (v. [§3.1](#) e [§3.2](#)) costituiscono informazioni utili a rispondere alle esigenze dell’indicatore 5 relativo ai processi fluviali e alla dinamica morfologica ([Tabella 1](#)). In particolare, consentono di disporre di un nuovo strato informativo in grado di fornire una quantificazione innovativa dell’evoluzione temporale dei processi idromorfologici applicabile alle diverse scale spaziali, compresa quella nazionale.

Per una discussione sul futuro utilizzo operativo di questi strumenti e sulle prospettive che aprono per la caratterizzazione idromorfologica dei fiumi in Italia si rimanda al [Capitolo 5](#).



(a)

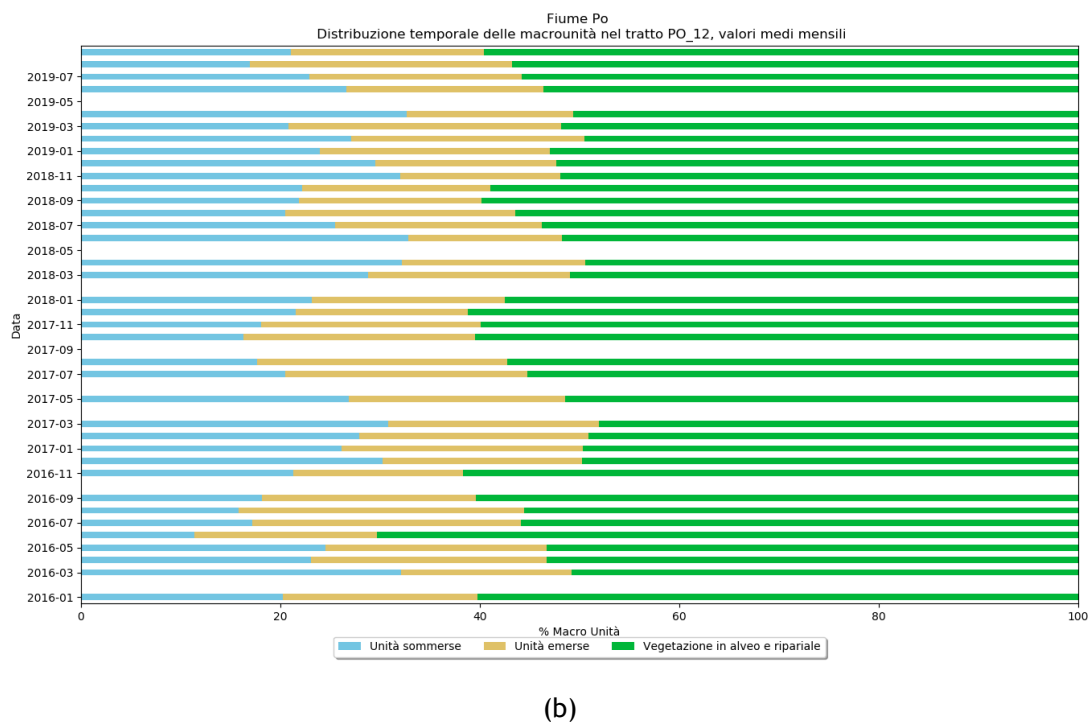


Figura 19 – Istogramma della distribuzione delle macro-unità “unità sommerse”, “unità emerse” e “unità di vegetazione in alveo e ripariale” per il tratto PO\_07 (a) e il tratto PO\_12 (b) del fiume Po. I valori riportati sono riferiti alle medie mensili.

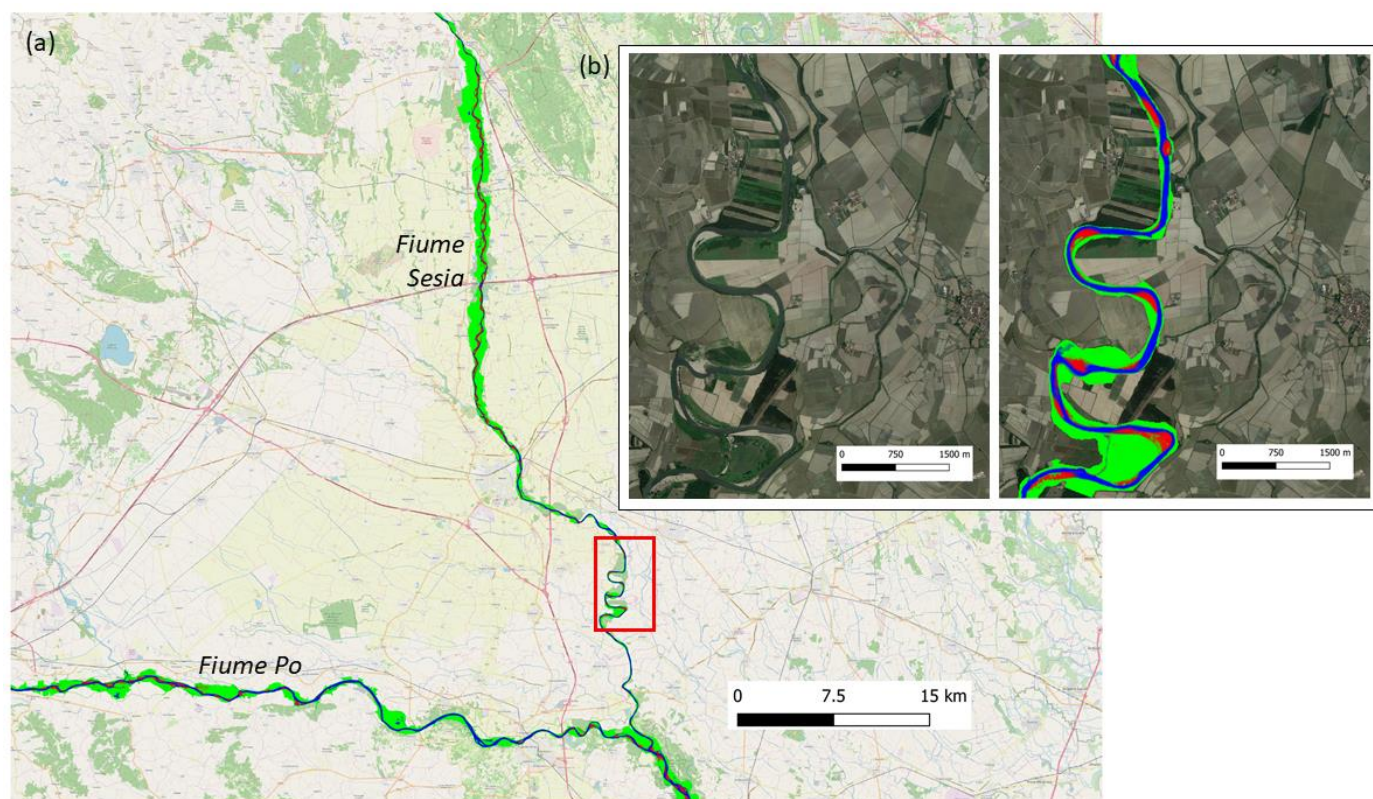


Figura 20 – Risultato dell’applicazione del classificatore alla serie temporale lungo i corridoi di Po e Sesia (tile TMR). (a) Immagine RGB in falsi colori ottenuta dalle frequenze medie mensili delle classi di “unità sommerse” (banda blu), “unità emerse” (banda rossa) e “unità di vegetazione in alveo e ripariale” (banda verde). (b) Dettaglio del tratto SE\_10 lungo il Sesia, identificato con il rettangolo rosso in (a). L’immagine di fondo utilizzata in (a) è estratta da OpenStreetMap per QGIS mentre quelle in (b) sono estratte dal TMS di Google Satellite per QGIS.



## 4 Indicatori 2 e 5: Classi granulometriche e processi d'alveo integrando S1 e S2

La scelta di discutere l'indicatore 2 e ulteriormente l'indicatore 5 nel medesimo capitolo è motivata dall'interdipendenza delle relative procedure di calcolo.

Alla base dell'obiettivo di valutare con dati da satellite granulometria e processi morfologici d'alveo (topografici, ossia in 3D) vi è l'ipotesi che la scabrezza e le proprietà geometriche (per esempio concavità e convessità) delle unità emerse influenzino sia la riflettanza spettrale (S2) che l'intensità riflessa dell'onda SAR (S1). In presenza di una barra di sedimenti pianeggiante e composta da granulometria omogenea, come molte di quelle campionate, è plausibile desumere che sia proprio la granulometria a influenzare le diverse riflettanze e che pertanto sia possibile identificare un legame tra granulometria media (espressa dal diametro medio dei sedimenti, D50) e intensità della riflettanza. Inoltre, la distribuzione della granulometria nello spazio e nel tempo potrebbe essere un'informazione proxy per capire dove, a seguito di un determinato evento di piena che ha causato cambiamenti morfologici, sia più probabile che avvengano erosione e/o deposizione: in caso di erosione ci si aspetta un aumento della granulometria; in caso di deposizione ci si aspetta una diminuzione della granulometria indotta dal materiale più fine depositato sulle barre esposte (v. [Figura 21](#)). A tal proposito si veda anche Cavalli and Marchi (2008).

Nei paragrafi successivi vengono riportati e discussi i risultati ottenuti dall'analisi della relazione tra le granulometrie medie campionate tramite rilievi da drone e le bande dei dati di S2 ([§4.1](#)) e della relazione tra i cambiamenti morfologici rilevati da DoD (*DEM of Differences*) e geometrici osservati e la coerenza e l'ampiezza derivate dai dati satellitari SAR di S1 ([§4.2](#)). Come esempio, si riportano le analisi fatte per il sito del fiume Po tra settembre 2017 e settembre 2018.

Le opportunità e i limiti emersi da queste prime analisi esplorative riguardo alle potenzialità associate all'osservazione della granulometria e dei processi morfologici d'alveo (3D) da satellite sono discusse nel [Capitolo 5](#).



Figura 21 – Aumento e diminuzione della granulometria a seconda dei processi di erosione e deposizione avvenuti.

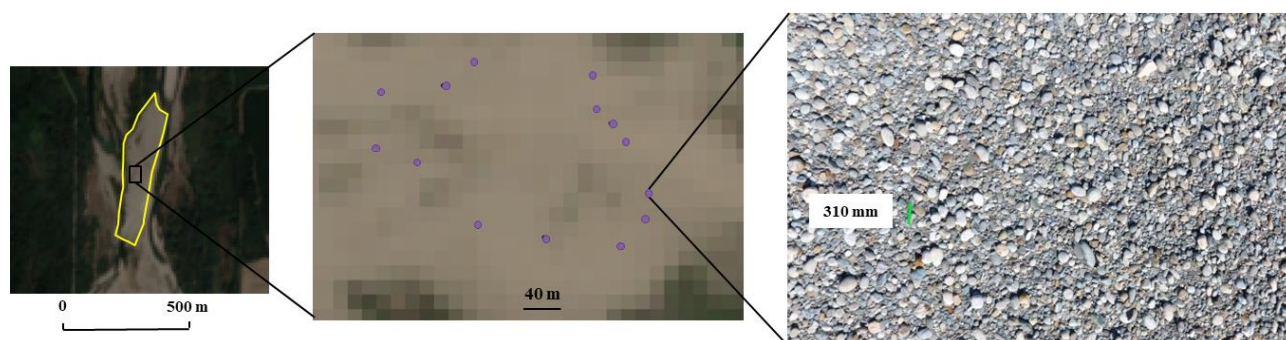
### 4.1 Stima della Granulometria da dati di S2

La metodologia per la derivazione dei dati di granulometria da rilievi da drone è descritta in dettaglio nella Relazione tecnica intermedia n. 2. Nell'analisi qui riportata vengono utilizzate le granulometrie medie (diametro mediano D50) delle sole unità emerse (barre di sedimento) che presentano una pezzatura omogenea e una superficie mediamente pianeggiante. Questo ultimo accorgimento è importante per essere certi di rimuovere l'eventuale effetto di rugosità legato a possibili forme geometriche fortemente convesse o concave della superficie. Nella Relazione tecnica intermedia n. 2 sono stati specificati in dettaglio i siti adatti all'analisi granulometrica utilizzando questa metodologia. Si ricorda, per esempio, che le granulometrie dei siti campionati sulla fiumara Bonamico non sono state incluse nelle analisi perché

presentano, localmente, una pezzatura fortemente eterogenea, da sabbia fino a granulometrie medie superiori ai 10-20 cm. I siti selezionati sul fiume Paglia non sono stati utilizzati per questi scopi, a causa delle modeste dimensioni delle barre selezionate e della presenza di vegetazione densa sulle stesse.

Le immagini da drone incluse nell'analisi della granulometria sono in totale 51 e provengono dai siti acquisiti sul Po e sul Sesia. Alcuni di questi dati provengono da siti acquisiti precedentemente all'accordo di collaborazione ISPRA-DEIB, nell'ambito di campagne di misure effettuate comunque con le stesse modalità; si è, infatti, ritenuto utile integrare i dataset aumentando la numerosità del campione e la variabilità della granulometria media monitorata.

Il dataset di analisi è stato generato associando il diametro medio (D50) calcolato per ogni foto da drone (verità a terra, con BASEGRAIN – v. Relazione tecnica intermedia n. 2), le quali essendo scattate da un'altezza di 5-7 m coprono ciascuna un'area di circa 100 m<sup>2</sup>, con il pixel di S2 che copre la maggior parte di tale area (per un esempio si veda [Figura 22](#)). La data dell'acquisizione di S2 selezionata per il confronto è quella più vicina al giorno in cui la foto è stata scattata, escludendo le date in cui la copertura nuvolosa o il verificarsi di precipitazioni nei due o tre giorni precedenti potessero compromettere la qualità dell'acquisizione per le finalità dello studio (una tabella delle date S2 associate alle date delle acquisizioni da drone è presente nell'allegato digitale). In particolare, l'esclusione in caso di precipitazioni nei giorni precedenti è legata all'influenza che l'umidità ha sulla riflettanza di alcune bande spettrali.



**Figura 22 – Associazione del D50 ricavato tramite *photosieving* dalle immagini da drone al pixel S2 corrispondente e relative scale. A sinistra: esempio di unità emersa campionata sull'immagine RGB di S2; al centro: zoom all'interno dell'unità emersa in cui sono indicati, con pallini viola, i pixel ai quali è stato associato un valore di D50 calcolato a partire dall'immagine drone corrispondente; a destra esempio di immagine da drone utilizzata per un particolare pixel.**

Come primo passo di analisi è stato calcolato l'indice di correlazione di Pearson (si veda [Tabella 7](#)) tra le riflettanze nelle singole bande dei pixel delle immagini S2 e i valori del D50 estratti a partire dalla verità a terra. Con l'esclusione delle bande nel visibile B2 e B3 tutte le altre mostrano una correlazione negativa con il D50, cioè all'aumentare del D50 l'intensità del segnale diminuisce in accordo con l'ipotesi iniziale secondo cui una maggiore rugosità comporta una diminuzione di intensità nel segnale riflesso. Inoltre, si nota che l'intensità della correlazione aumenta progressivamente spostandosi verso lunghezze d'onda maggiori: infatti la massima correlazione si ha nell'infrarosso per la B12. La [Figura 23](#) mostra i dati di D50 in funzione di B12.

**Tabella 7 - Indice di correlazione di Pearson tra le bande S2 e il valore di D50 osservati dal dataset di verità a terra.**

B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12
0.50	0.25	-0.20	-0.34	-0.30	-0.32	-0.28	-0.33	-0.58	-0.72

Sulla base di questa analisi preliminare si è quindi creato un modello di regressione lineare *Hubert Regressor*, utilizzando le librerie di *machine learning* *scikit-learn* (<https://scikit-learn.org/stable/>) in

ambiente Python, che predice il D50 utilizzando come ingressi le informazioni provenienti da tutte le bande dei dati di S2 considerati. In [Figura 24](#) sono riportati i risultati della *k-fold cross-validation* (con 5 *k-fold*) tra osservato e predetto. Dai risultati emerge come la predizione del D50 abbia un errore medio assoluto in validazione di 7.48 mm per granulometrie che variano dalla sabbia (circa 1 mm) fino ad un diametro medio di 90 mm (ciottoli). Per D50 superiore ai 50 mm, essendo limitato il campione disponibile, il modello tende a sottostimare significativamente le granulometrie. La [Figura 25](#) riporta i coefficienti del modello per ogni banda S2. Le bande con coefficienti più elevati sono la B12 (-0.044) e la B2 (0.054). La prima ha un coefficiente negativo ed è la banda con il più alto valore del coefficiente di correlazione di Pearson con il D50 ([Tabella 7](#)). Questa banda si ritiene venga usata dal modello per simulare il processo ipotizzato secondo cui una maggiore rugosità comporta una diminuzione di intensità nel segnale riflesso. Più difficile dare un'interpretazione fisica della funzione nel modello delle altre bande. Per esempio la B2 e la B3, nel visibile, hanno coefficienti del modello positivi ed elevati, rispettivamente 0.054 e 0.035, quindi ad un aumento del D50 corrisponde un aumento dell'intensità della banda riflessa. Questa relazione è coerente con quanto emerso dai valori dei coefficienti di correlazione di Pearson rispetto al D50 osservato ([Tabella 7](#)), che risultano tuttavia più bassi rispetto a quelli della B12 (-0.72), in particolare per la B3 (0.25). Nel modello di predizione della granulometria è probabile che le bande B2 e B3 presentino correlazioni legate alla specifica natura del dataset: litologia, morfologia, presenza di vegetazione, luminosità del sito al momento dell'acquisizione, tutti fattori che influenzano la riflettanza delle bande (Brivio et al., 2016) ma che non sono generalizzabili perché sito specifici. Un ragionamento simile vale anche per le restanti bande (B4, B5, B6, B7, B8, B8A e B11). Per esempio, nel caso delle B6, B8A e B11 il coefficiente nel modello ha segno positivo mentre i loro coefficienti di correlazione di Pearson con il D50 ([Tabella 7](#)) hanno segno negativo. Questa incoerenza è imputabile probabilmente al ruolo preponderante svolto dalla B12, in termini di correlazione negativa, per cui il contributo di queste bande nel modello sembra puramente numerico.

Costruendo un modello che utilizzi la sola banda B12 si ottiene un errore medio assoluto di 15.07 mm con un coefficiente di -0.032. Ciò a dimostrazione della necessità di considerare anche le altre bande per la costruzione di un modello più performante.

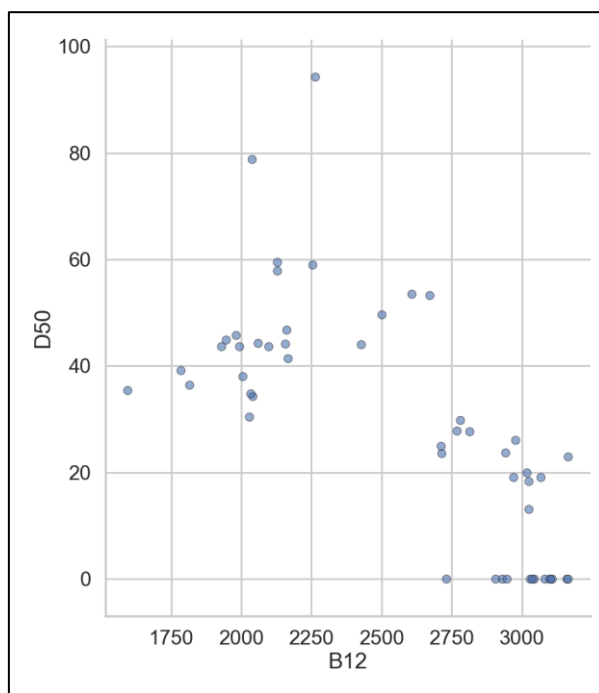


Figura 23 – Correlazione tra B12 e i valori D50 osservati dal dataset di verità a terra.

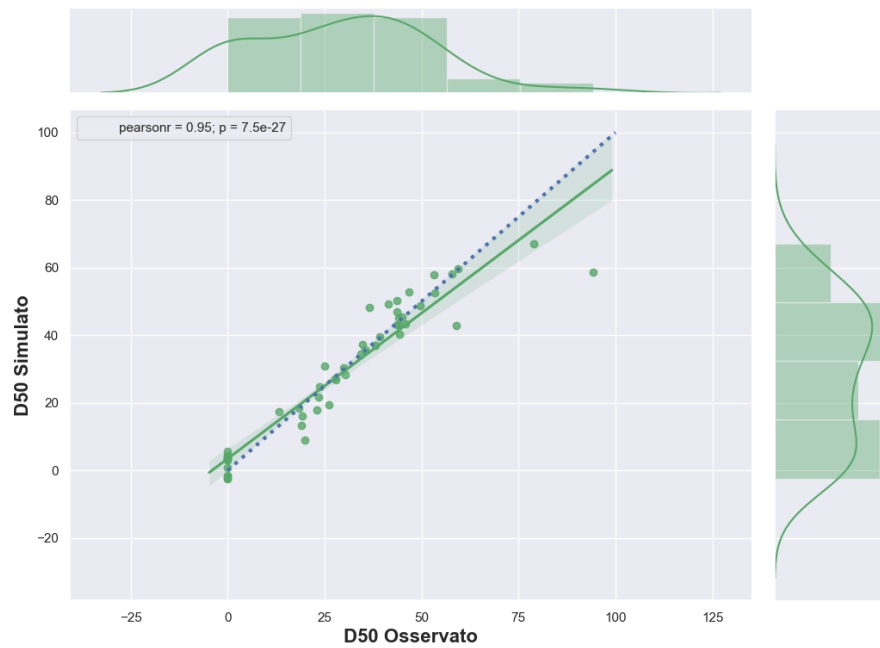


Figura 24 – Granulometria media (D50) osservata e predetta per le 51 immagini analizzate.

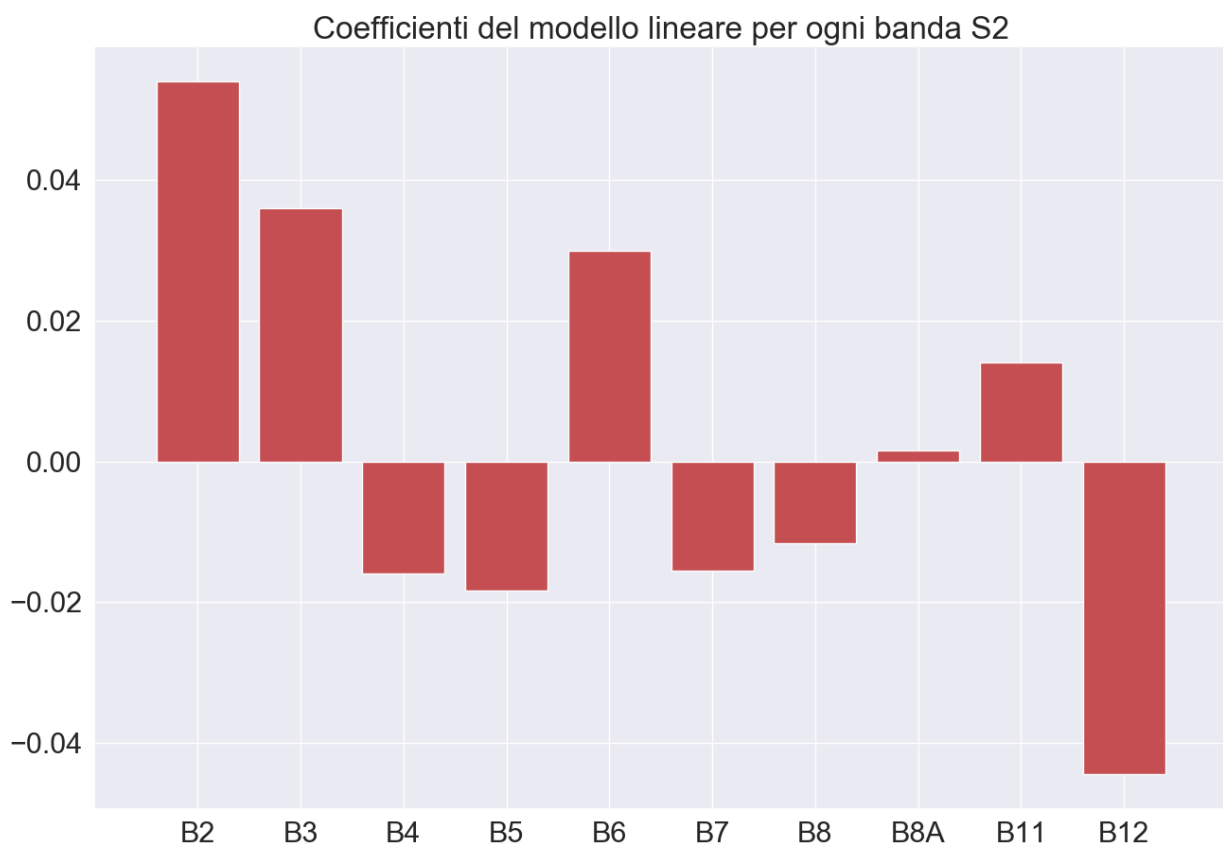


Figura 25 – Valori dei coefficienti per le bande S2 per il modello lineare di [Figura 24](#).

Al fine di testare le prestazioni del modello sulla scala di un intero corridoio fluviale e vedere se sia in grado di riprodurre la tipica traiettoria di diminuzione della granulometria verso valle (processo di *fining*; si veda Rice, 1999; Surian, 2002), il modello è stato applicato su barre di sedimenti emerse selezionate lungo

circa 500 km lungo l'asta del fiume Po. A partire dalle immagini Sentinel-2 RGB, tramite fotointerpretazione, sono stati selezionati pixel appartenenti a barre di sedimento dotate delle caratteristiche richieste: essere omogenee, non vegetate, con area minima di 1000 m<sup>2</sup>. La [Figura 26](#) mostra l'asta del fiume Po, in cui le barre selezionate sono in rosso, e uno zoom su un esempio di barra. Per essere sicuri che i pixel selezionati non fossero contaminati da acqua e/o vegetazione, è stato applicato un filtro utilizzando gli indici di vegetazione (NDVI) e di acqua (NDWI): i pixel con valori di NDWI < 0.2 e/o con  $-0.2 < \text{NDVI} < 0.2$  sono stati esclusi dall'applicazione del modello.



Figura 26 – Barre selezionate (in rosso) lungo circa 500 km dell'asta del Po sulle quali è stato applicato il modello. A destra è riportato uno zoom riferito a un esempio di barra selezionata.

La [Figura 27](#) mostra che il modello predice bene la traiettoria di diminuzione della granulometria da monte verso valle e che i valori di D50 ottenuti sono dell'ordine di grandezza dei valori osservati a terra (triangoli verdi). Un'eccezione evidente è quella che si nota intorno ai 290 km da valle in cui si riscontra un anomalo aumento della granulometria predetta. Rimane da verificare se questo aumento di granulometria sia reale o, più probabilmente, un errore del modello che potrebbe giustificarsi con l'assenza, nel campione utilizzato per la calibrazione del modello, di dati osservati a terra nella porzione di asta compresa tra i 200 e i 370 km da valle, ad ulteriore riprova della natura sito specifica del modello.

I risultati sin qui ottenuti per la predizione della granulometria media da S2 sono promettenti, pur essendo necessarie ulteriori analisi su altri fiumi per un adeguato *testing*. Rimane da verificare e approfondire il significato fisico nel modello delle varie bande e capire come queste relazioni varino al variare dei contesti di litologia e morfologia. Questo permetterebbe di capire come definire la variabilità e la numerosità del dataset di verità a terra in modo da poter calibrare un modello generalizzato di predizione del diametro medio dotato di sufficiente accuratezza (per esempio con errori inferiori ai 10 mm). Per un'ulteriore discussione sugli sviluppi futuri si veda il [Capitolo 5](#).



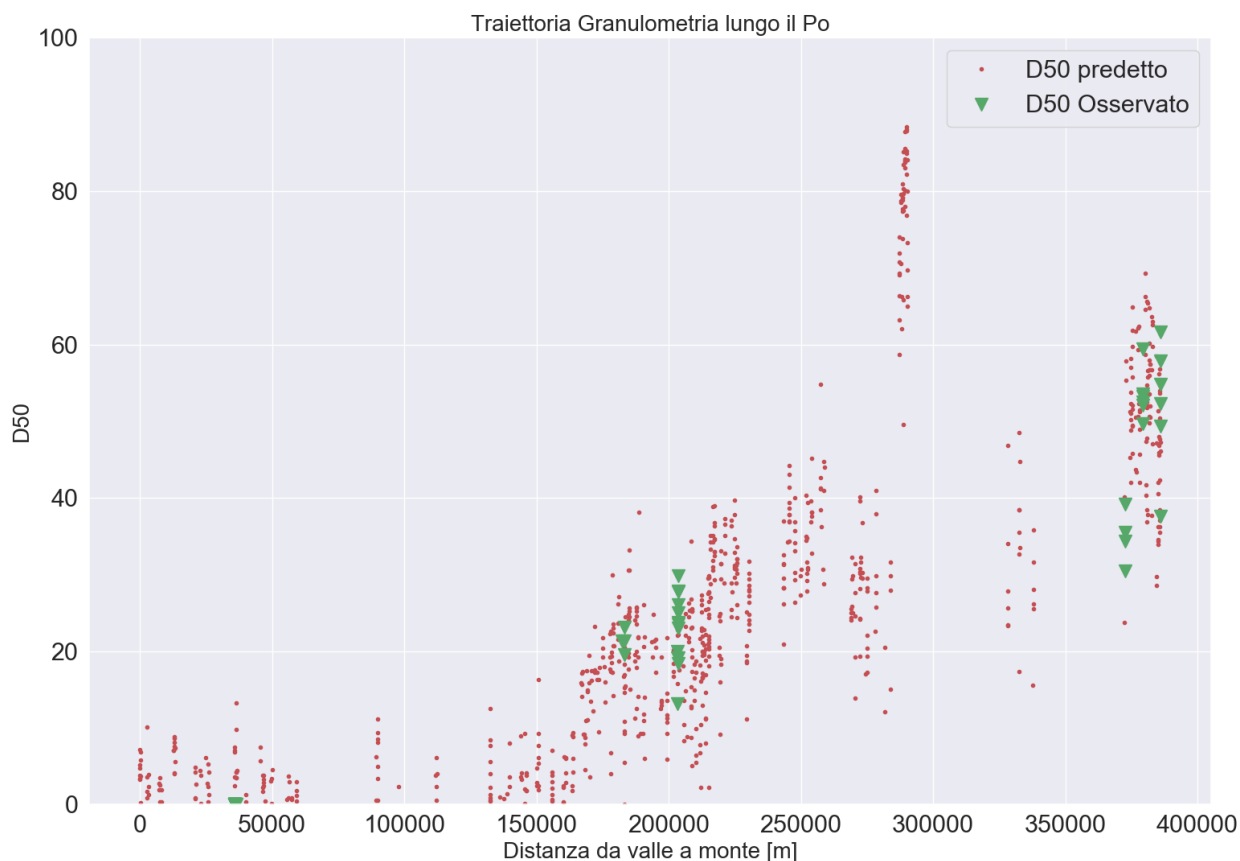


Figura 27 – Profilo longitudinale dei valori di D50 predetti dal modello lungo il fiume Po per i pixel selezionati (punti rossi) e di quelli osservati (triangoli verdi), ottenuti dalle acquisizioni tramite drone e utilizzati nella fase di calibrazione del modello (v. [Figura 24](#)).

#### 4.2 Analisi della coerenza e dell'intensità da S1 per la valutazione qualitativa dei cambiamenti morfologici avvenuti nel sito del fiume Po

In questa sezione vengono presentati i risultati degli esperimenti effettuati per valutare le potenzialità dei dati satellitari SAR di S1 nel rilevare cambiamenti morfologici (deposizione ed erosione). Come caso studio è stato scelto il sito del Po, poiché tra tutti i siti studiati è quello che è stato interessato da cambiamenti morfologici più significativi tra settembre 2017 e settembre 2018. La [Figura 28](#) mostra le portate per la stazione di Isola S. Antonio, posta subito a monte del sito del Po, tra febbraio e luglio 2018. In questo periodo si sono susseguite una serie di portate elevate che hanno generato ripetute sommersioni, parziali o totali, della barra di sedimento situata lungo il sito di studio e l'apertura di un canale secondario che si è mantenuto attivo fino alla stagione estiva, come si può notare dalle immagini in [Figura 29](#).

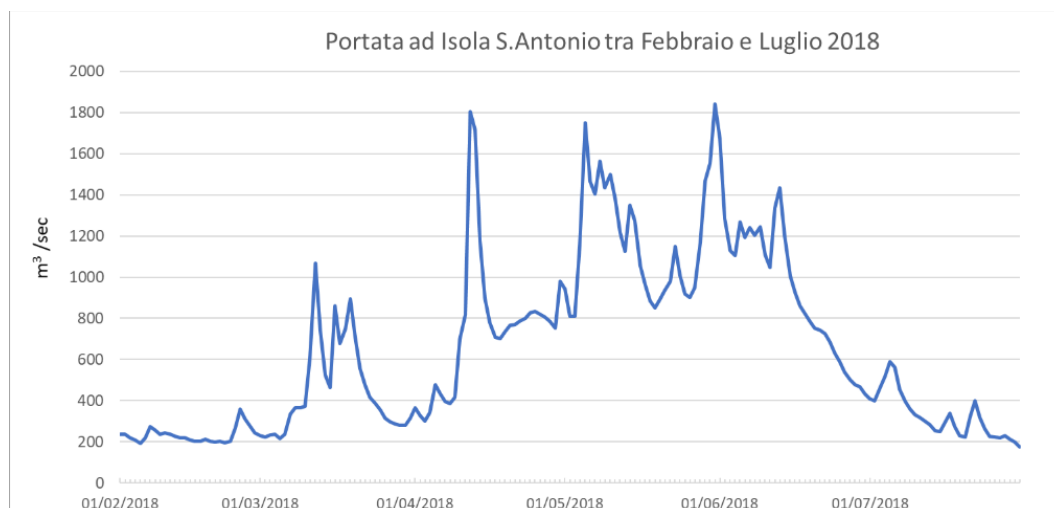


Figura 28 – Portata della stazione Isola S. Antonio, situata subito a monte del sito del Po analizzato, tra febbraio e luglio 2018.



Figura 29 – Sito di studio sul fiume Po, immagini estratte da planet.com. A sinistra la barra di sedimento come appariva il giorno 13 febbraio 2018. Al centro è visibile la barra di sedimento inondata il 16 marzo 2018, a seguito dell'evento di piena e il canale secondario, in sponda sinistra, che ne è risultato. A destra, la barra in stagione estiva, dove si nota il canale secondario ancora parzialmente attivo.

Innanzitutto, è stato necessario identificare, sulla base dei dati di verità a terra acquisiti da drone, l'entità e la tipologia (erosione o deposizione) dei processi avvenuti. Si è proceduto dunque con la generazione del DoD, ossia la differenza di DEM acquisiti in due date diverse, a partire dalle nuvole dense di punti generate in *Photoscan* per le acquisizioni da drone di settembre 2017 e settembre 2018 (v. Relazione intermedia n. 2). Per la generazione del DoD è stato utilizzato il *software Cloud Compare*: si è dapprima calcolato il *mesh* per la nuvola densa di punti riferita all'acquisizione del 2017 e successivamente tramite il comando "*Cloud to mesh*" è stata calcolata la distanza tra la nuvola di punti del 2018 e il vertice del *mesh* (riferito al 2017) più vicino. L'output è una nuova nuvola di punti i cui valori si riferiscono alla distanza, lungo la direzione verticale, tra le nuvole di punti confrontate, rappresentando, quindi, la differenza di elevazione tra le due date di acquisizione. È così possibile valutare i cambiamenti morfologici (topografici) avvenuti nel tempo intercorso tra le date di acquisizione per il sito in esame. In [Figura 30](#) è riportato il DoD ottenuto nonché l'ortofoto ottenuta dall'ultima campagna di acquisizione con drone (settembre 2018). Le variazioni di elevazione sono espresse in metri.

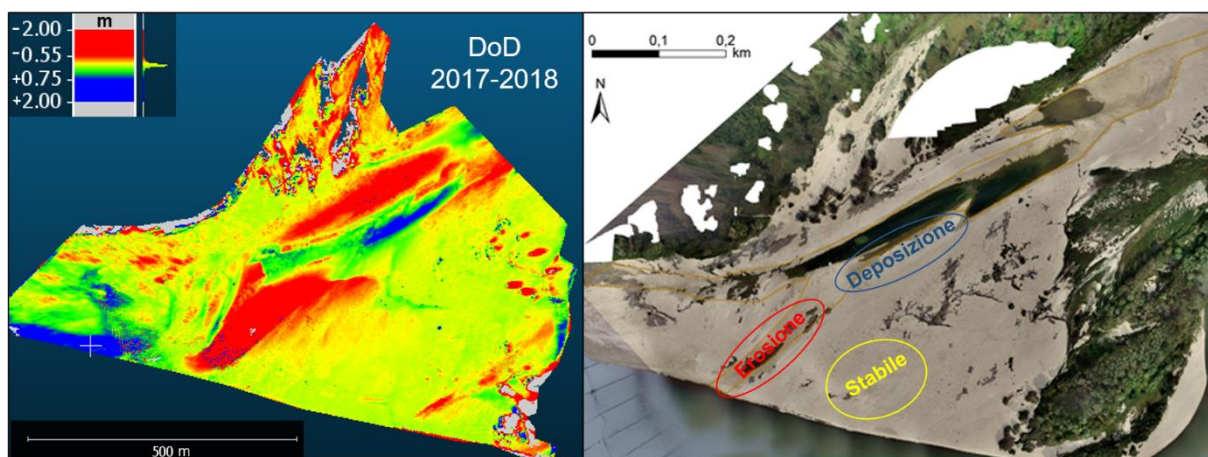


Figura 30 – *Dem of Difference* (DoD) tra settembre 2017 e 2018 (sinistra) e ortofoto di settembre 2018 con l'indicazione dei processi che hanno interessato le varie porzioni di alveo (destra) per la zona analizzata in corrispondenza del sito sul fiume Po.

Nell'immagine di sinistra di [Figura 30](#) è possibile identificare, in base ai colori della scala riportata, i diversi processi che hanno interessato l'area esaminata. Si nota come la zona erosa, riportata in rosso, corrisponda agli attuali canali emersi (o “dry channel”, v. immagine a destra della [Figura 30](#)), tra cui quello generato nell'evento di piena di marzo 2018 e successivamente emerso durante la stagione estiva (risultando dunque in una depressione/zona erosa). In blu sono identificate le aree che nel 2018 sono più alte rispetto al 2017 e quindi corrispondono a zone in cui c'è stata deposizione. In verde sono evidenziate le zone con cambiamenti morfologici di minore entità (dell'ordine di  $\pm 0.4$  m). In giallo sono riportate le zone considerate “stabili” in termini di cambiamenti morfologici occorsi tra le due date analizzate.

#### 4.2.1 Analisi coerenza

In questo capitolo si investiga l'esistenza di eventuali relazioni tra il segnale SAR S1 e le evidenze riscontrate nel DoD. Per fare ciò è stato necessario inizialmente generare dalle nuvole di punti relative alle acquisizioni da drone nuovi raster aventi la stessa risoluzione e lo stesso sistema di riferimento dei *tile* di S1. Sono state quindi condotte analisi di confronto tra i dati di coerenza e di intensità da S1 e i cambiamenti morfologici osservati e quantificati con il DoD ottenuto dai nuovi raster. I codici di confronto tra DoD e dati satellitari sono stati scritti in ambiente Python (e sono disponibili nell'allegato digitale).

Il calcolo della coerenza viene effettuato tra coppie di immagini, solitamente prima e dopo un evento che ha causato cambiamenti nel sito interessato. Una eventuale riduzione nel valore di coerenza tra due immagini a cavallo dell'evento testimonia il verificarsi di cambiamenti significativi (associati a una perdita di coerenza del segnale). In generale, e a maggior ragione in ambito fluviale, il semplice confronto tra i valori di coerenza *pre* e *post* evento non consente di concludere che la variazione di coerenza sia collegata solamente ai cambiamenti morfologici. Infatti, è normale che la coerenza diminuisca nel tempo (tempo di decorrelazione), essendo influenzata da diversi fattori e rumori sito e tempo specifici (es. sviluppo della vegetazione). Al fine di comprendere e discriminare i diversi contributi che causano perdita di coerenza è necessario analizzare l'andamento della coerenza nel tempo in un arco temporale sufficientemente lungo (ad es., un anno).

Per fare ciò, nel caso specifico, l'analisi è stata condotta sulle immagini S1 su un arco temporale che va da settembre 2017 a ottobre 2018. L'obiettivo è investigare come la coerenza si comporta in aree caratterizzate da distinti processi morfologici nell'arco temporale considerato. Per far ciò nel DoD si sono identificate tre zone: una zona di erosione dove pixel continui del DoD (ricampionato in base alla risoluzione dei dati S1) hanno valori maggiori di 0.5 m (quest'area è situata all'interno dell'ovale rosso in [Figura 30](#) a

destra); una zona di deposizione dove pixel continui del DoD hanno valori minori di  $-0.5$  m (ovale blu riportato in [Figura 30](#) a destra); e una zona stabile caratterizzata da pixel continui del DoD nel *range* tra  $-0.4$  e  $0.4$  m (ovale giallo in [Figura 30](#) a destra). La coerenza è calcolata su finestre di pixel che corrispondono alle tre aree di erosione, deposizione e stabile identificate. La coerenza, come detto, viene calcolata tra coppie di immagini e fornisce un'informazione su quanto le condizioni del sito di studio in una data sono simili all'altra data scelta. Per questa analisi e per studiare l'andamento della coerenza nel tempo, è stata calcolata la coerenza tra tutte le possibili combinazioni di coppie di date di acquisizione di S1 nell'arco temporale di un anno (settembre 2017–ottobre 2018). Questa analisi è stata fatta distintamente sulle tre zone di erosione, deposizione e stabile. In [Figura 31](#), [Figura 32](#) e [Figura 33](#) sono riportate le mappe (*heatmaps*) per le tre zone. Ogni elemento della mappa corrisponde ad una coppia di date, riportate su ascisse e ordinate del grafico, di cui viene calcolata la coerenza. I colori in scala di blu si riferiscono al valore che assume la coerenza per ognuna di queste coppie di date: più il valore di coerenza è vicino a 1 (colori blu scuro) più le due date analizzate sono coerenti e simili tra di loro. Più la coerenza è bassa, quindi vicina allo zero (colori azzurro chiaro) più le due date analizzate differiscono. La diagonale della mappa è pari ad uno poiché corrisponde al calcolo della coerenza di una data per sé stessa. Più ci si allontana nel tempo, andando verso gli angoli opposti alla diagonale della matrice, più la coerenza si abbassa a causa dei fattori sopra citati. Come si può notare, intorno alla diagonale si formano dei quadrati più o meno grandi in blu più scuro, che corrispondono a periodi in cui la coerenza si mantiene alta, quindi a periodi in cui le caratteristiche del sito si mantengono circa costanti. Rettangoli più grandi corrispondono dunque a periodi stabili più lunghi. In seguito a un evento che provoca un cambiamento importante sul sito e l'area in esame, la coerenza si azzerava, delimitando la chiusura di un quadrato e, eventualmente, l'apertura di un nuovo periodo di stabilità.

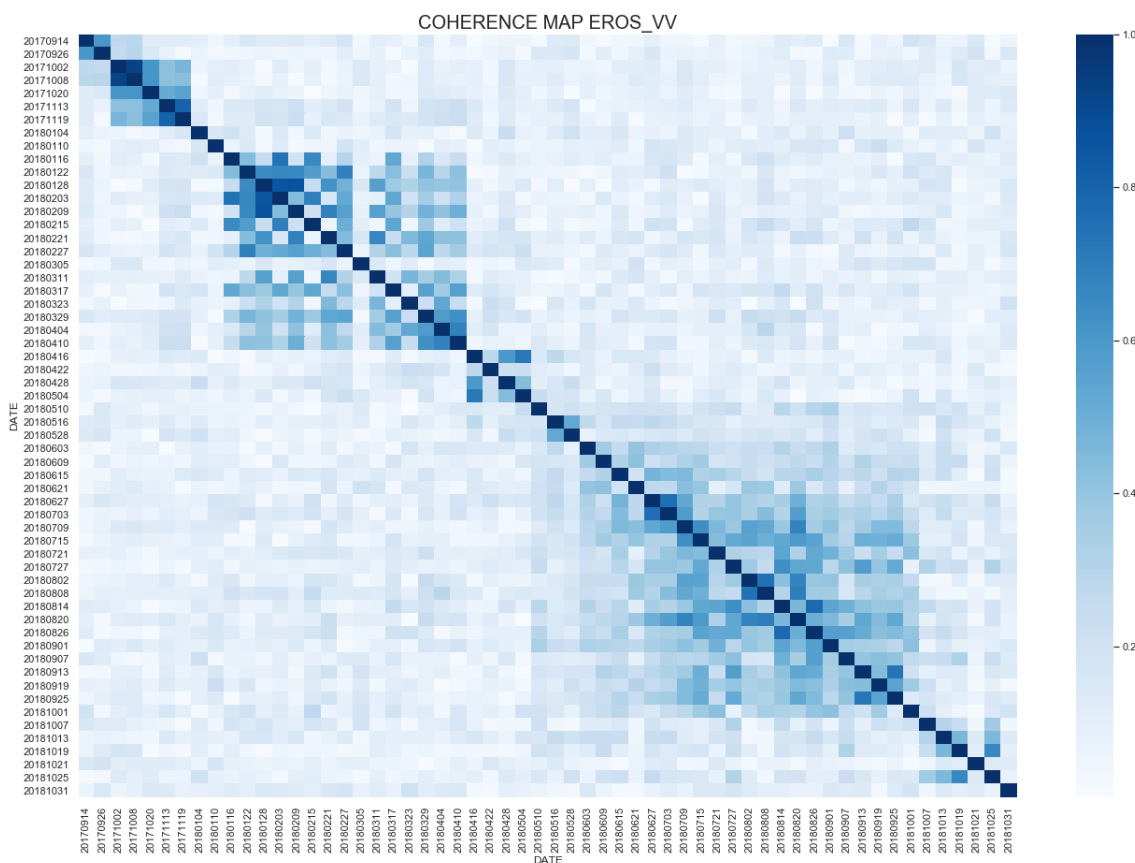


Figura 31 – Mappa di coerenza per la zona di erosione, da settembre 2017 a ottobre 2018.

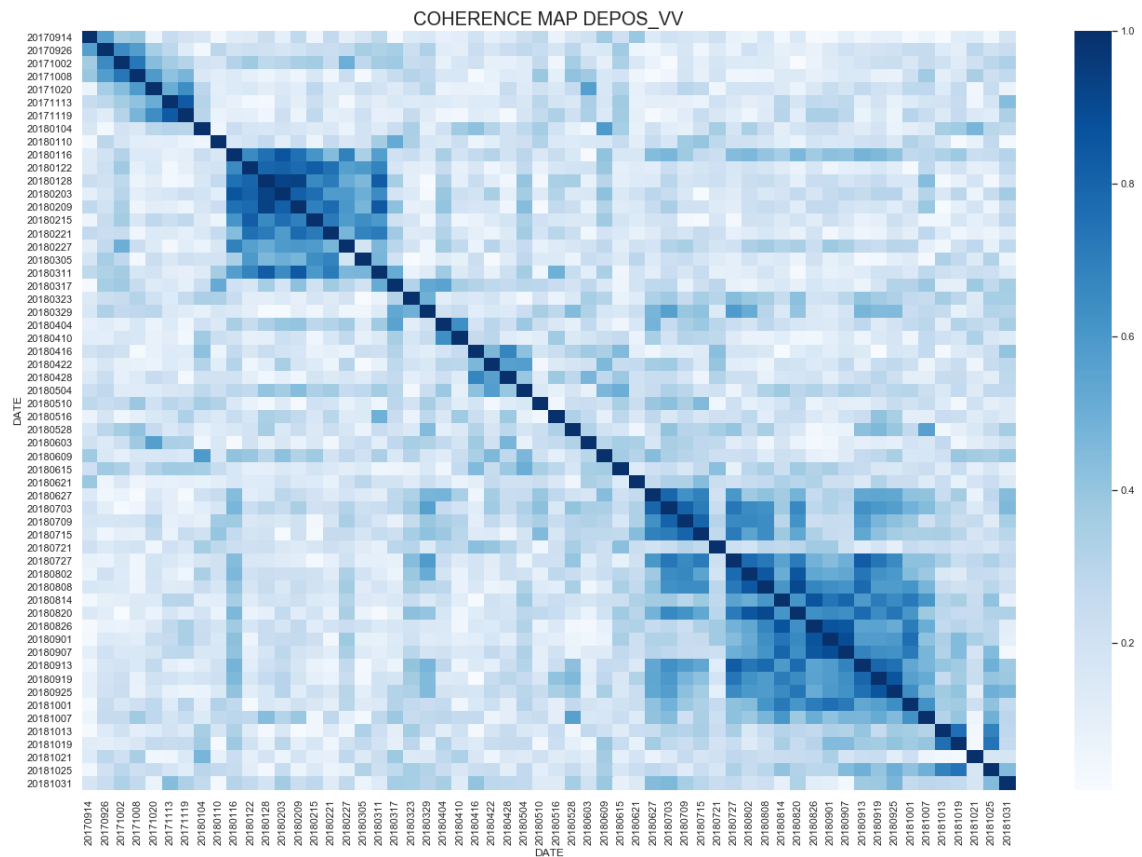


Figura 32 – Mappa di coerenza per la zona di deposizione, da settembre 2017 a ottobre 2018.

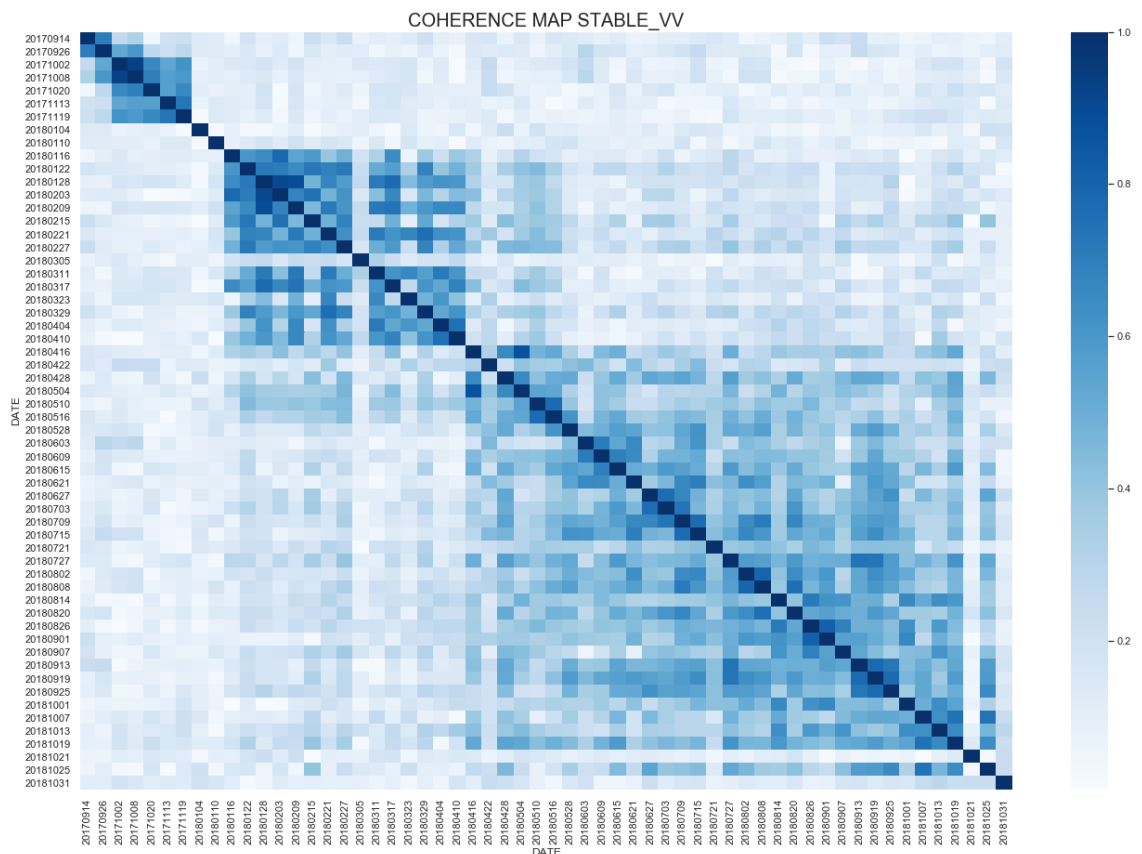


Figura 33 – Mappa di coerenza per la zona stabile, da settembre 2017 a ottobre 2018.



Questo tipo di elaborazione fornisce informazioni utili per studiare l'andamento della coerenza nelle diverse stagioni dell'anno e identificare date specifiche in cui è avvenuta una perdita di coerenza, cercando di risalire all'evento che l'ha indotta. Guardando le mappe delle tre zone analizzate, si nota che da marzo a tutto giugno si susseguono valori di bassa coerenza alternati a valori di alta coerenza, che creano piccoli rettangoli di colore blu più intenso. Una data significativa per tutte e tre le zone è il 10 aprile 2018 in cui avviene un evento che genera un abbassamento importante di coerenza. I valori di coerenza e il loro andamento nel tempo sono coerenti con l'andamento delle portate: il 12 aprile 2018 infatti viene raggiunto il picco di piena di 1805 m<sup>3</sup>/s mentre il 10 aprile la portata era nella fase ascendente (697 m<sup>3</sup>/s, v. [Figura 28](#)). È probabile che in quelle date siano avvenuti molti dei cambiamenti morfologici registrati tramite il DoD. In [Figura 34](#) si riporta l'immagine satellitare della barra quasi totalmente sommersa il 12 aprile 2018. Successivamente, fino a luglio 2019, si sono susseguiti almeno altri tre picchi di portata e in generale la portata si è mantenuta medio alta per tutto il periodo (v. [Figura 28](#)). Queste portate possono spiegare la bassa coerenza che si è avuta tra aprile e giugno soprattutto nelle zone di erosione e deposito esposte con più probabilità a cambiamenti morfologici, come dimostrato dalla creazione del nuovo canale secondario, rispetto alla zona stabile, dove invece dal 16 aprile al 31 ottobre 2018 si osserva un periodo di più alta coerenza (stabilità), differentemente dalle zone di erosione e deposizione.



Figura 34 – Barra di studio inondata dalla piena del 12 aprile 2018, immagine estratta da planet.com.

In seguito, a partire dal mese di giugno, con l'avvicinarsi della stagione estiva, la coerenza nelle zone di erosione e deposizione scema gradualmente al prosciugarsi dell'acqua nel canale. La zona stabile è, invece, soggetta meno frequentemente a inondazioni e la coerenza si mantiene più alta per un periodo più lungo.

In sintesi, queste mappe mostrano buone potenzialità per la comprensione qualitativa dei processi che possono interessare la barra nel corso di un arco temporale, soprattutto permettendo di mettere in evidenza le date in cui la perdita di coerenza è stata importante e nelle quali ha senso valutare il legame con gli eventi idrologici avvenuti.

#### 4.2.2 Analisi intensità

È stata condotta anche un'analisi visivo-qualitativa sulla distribuzione spaziale dei valori di intensità da S1 per il sito del Po. L'obiettivo è investigare la distribuzione spaziale dei valori di intensità nell'intera area occupata dalla barra laterale emersa situata nel tratto campione (come visibile in [Figura 30](#)) in alcune date precedenti e successive all'evento di piena formativa di aprile 2018 che ha modificato la morfologia della barra. I dati di intensità del segnale SAR, infatti, sono influenzati dalle caratteristiche fisiche e geometriche della superficie (Ferretti et al., 2007), quindi ci si aspetta che a valle di cambiamenti morfologici significativi il segnale si modifichi in base alle nuove forme e granulometrie assunte dalla barra. Per questa analisi è opportuno selezionare immagini S1 in date in cui si esclude la presenza di suolo umido legato a precedenti eventi di pioggia, poiché l'umidità del suolo influisce sull'intensità del segnale riflesso.

Sono state selezionate due immagini S1 vicine alle date di acquisizione da drone, rispettivamente a settembre 2017 e settembre 2018. Ci si aspetta che la distribuzione dell'intensità sia simile per le acquisizioni in date ravvicinate e che emergano differenze più marcate a distanza di un anno all'interno del quale siano avvenuti cambiamenti morfologici rilevanti. A supporto dell'interpretazione dei dati di intensità sono state considerate sia l'ortofoto che il DoD generati (come visibile in [Figura 30](#)).

In [Figura 35](#) si riportano le distribuzioni dei valori di intensità per due date vicine all'acquisizione di settembre 2017 (rispettivamente il 26 settembre e il 10 ottobre; pre-evento) e per due date vicine all'acquisizione di settembre 2018 (il 20 agosto e il 25 settembre; post-evento). Si usa una scala di colori per ogni pixel S1, dal blu al verde-giallo, per valori crescenti di intensità.

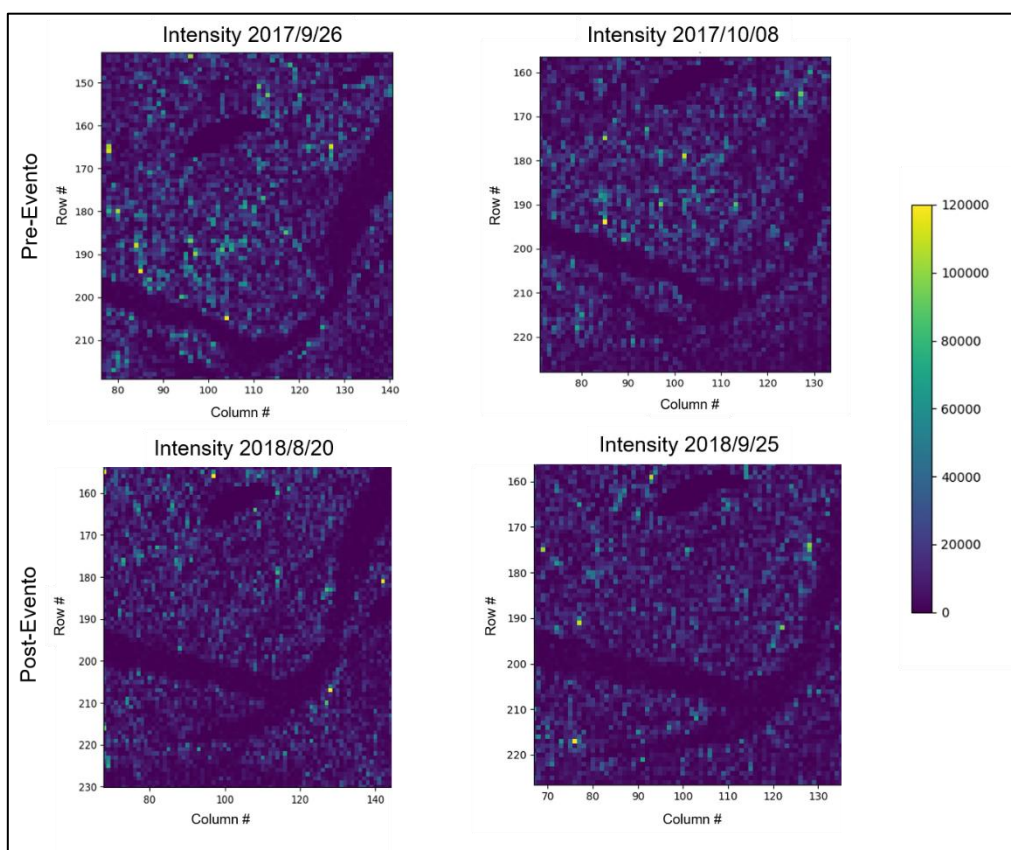


Figura 35 – Analisi della distribuzione dell'intensità da S1 nello spazio sul sito del Po per 4 date. Valori crescenti d'intensità passano dal blu al verde fino al giallo. Per l'immagine in RGB corrispondente si rimanda alla [Figura 30](#).

A una analisi visiva, le mappe pre-evento riferite al 2017 prese a un mese di distanza mostrano una similitudine nelle intensità dei pixel. Stessa considerazione vale per le due date selezionate nel 2018,

sempre distanziate di circa un mese. Guardando invece al confronto della stessa stagione (agosto-ottobre) a distanza di un anno (2017–2018), si osserva un abbassamento dell'intensità generalizzato per la barra. Il fatto che queste analisi rilevino un cambiamento è incoraggiante. Tuttavia, sappiamo che i valori di intensità sono influenzati da molteplici fattori tra cui umidità del suolo, presenza di vegetazione, rugosità della superficie (e quindi granulometria) e forme geometriche (Ferretti et al., 2007), quindi un cambio nei valori di intensità potrebbe essere legato ad una o più di queste cause. Purtroppo non sono disponibili dati sulla granulometria nelle zone caratterizzate da dinamiche morfologiche da confrontare tra le due acquisizioni a supporto dell'ipotesi di un cambio nell'intensità dovuto ad un cambio nella distribuzione granulometrica. Gli accorgimenti presi nella selezione delle date di S1 usate per queste analisi lasciano escludere la presenza di suolo umido a causa di precipitazioni. In [Figura 36](#) si riporta il dettaglio delle ortofoto da drone acquisite a settembre 2017 e settembre 2018 e utilizzate come verità a terra per l'interpretazione qualitativa delle analisi. Si nota che la vegetazione sulla barra è circa analoga a distanza di un anno, quindi possiamo escludere che l'effetto determinante il cambiamento di intensità sia la crescita o la presenza di vegetazione. Dall'ortofoto del 2018 si vede invece che il canale secondario eroso aveva ancora una piccola porzione ricoperta da un sottile strato di acqua, quindi alcuni (pochi) pixels interni alla zona erosa hanno intensità molto bassa a causa dell'acqua, che riflette in maniera speculare il segnale SAR e di conseguenza viene registrato un *backscattering* basso dal sensore per il periodo post-evento e per una porzione della zona interessata da erosione.

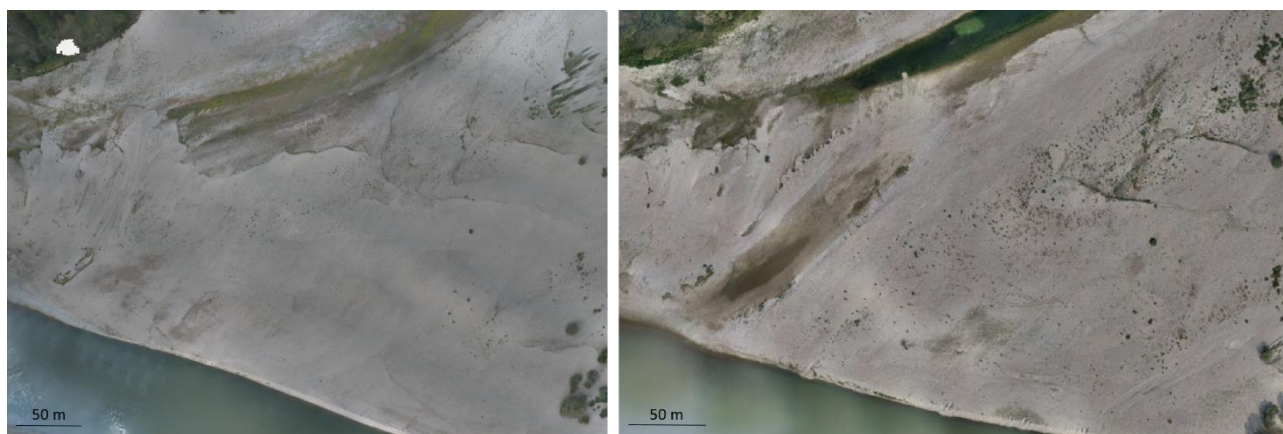


Figura 36 – Dettaglio delle ortofoto da drone sulla porzione di barra interessata dai cambiamenti morfologici. A sinistra: ortofoto di settembre 2017. A destra: ortofoto di settembre 2018. Per la localizzazione delle zone di erosione, deposizione e stabile si rimanda alla [Figura 30](#).

Dai risultati di questa analisi qualitativa possiamo quindi ipotizzare che l'abbassamento nel valore di intensità tra il 2017 e il 2018 sia legato a cambiamenti nella granulometria e nella morfologia, essendo il segnale di intensità sensibile a questi fattori e potendone, nel nostro caso studio, escludere altri (umidità suolo, presenza di vegetazione).

Data la difficoltà di monitorare cambiamenti morfologici significativi nell'arco temporale di un anno e mezzo, ossia quello disponibile per raccogliere i dati di campo nell'ambito del presente accordo di collaborazione, possiamo affermare di aver avuto una buona opportunità di investigare le relazioni tra dati di intensità e coerenza da S1 e i cambiamenti morfologici. Ulteriori analisi e nuovi casi studio sono necessari per identificare legami robusti tra andamenti di coerenza e intensità e i processi morfologici al netto del possibile contributo di tutte le diverse componenti che influenzano il segnale SAR. Per un'ulteriore discussione sugli sviluppi futuri si veda il [Capitolo 5](#).

## 5 Osservazioni sul monitoraggio idromorfologico a livello nazionale da dati telerilevati satellitari e da drone

Nell'ambito del presente accordo di collaborazione tecnico-scientifica tra DEIB e ISPRA sono stati esplorati specifici indicatori idromorfologici, basati su dati del Programma EU Copernicus e su acquisizioni da drone su tratti selezionati, finalizzati allo sviluppo di metodologie e strumenti applicativi in grado di supportare la produzione semi-automatica di parte degli indicatori previsti dal protocollo *IDRAIM-Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua* (Rinaldi et al., 2014, 2016a), e la valutazione da parte degli Enti territoriali preposti dello stato morfologico dei sistemi fluviali ai sensi della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE (WFD) e della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (FD) e delle relative norme di recepimento italiane. Le attività di analisi sono state focalizzate sull'utilizzo di dati acquisiti dalle missioni Sentinel-1 nel periodo settembre 2017-settembre 2018 e Sentinel-2 nel periodo novembre 2015-ottobre 2019.

La verità a terra, necessaria per calibrare e validare le procedure illustrate nella presente Relazione, è stata elaborata impiegando metodologie fotogrammetriche a partire da osservazioni da drone e da rilievo GPS (punti target e di controllo, v. Relazione tecnica intermedia n. 2) acquisite sui tratti campione in opportune campagne di misura. I 5 indicatori proposti ([Tabella 1](#)) coprono diversi aspetti del monitoraggio idromorfologico che vanno dalla generazione di mappe delle macro-unità morfologiche fino al monitoraggio dell'alveo bagnato (ai fini della stima delle portate), delle granulometrie e dei processi morfologici d'alveo. Individuare limiti e opportunità di applicazione per ogni indicatore è di grande importanza per pianificare il monitoraggio idromorfologico nazionale italiano dei prossimi anni, nonché per identificare le linee di ricerca più promettenti ove concentrare ulteriori approfondimenti a supporto di tale monitoraggio. Nei paragrafi successivi viene descritto, per ognuno degli indicatori proposti, il livello di operatività e il grado di sperimentazione raggiunti nell'ambito del progetto. Il capitolo termina con considerazioni sulle potenzialità emerse dal presente accordo in merito al monitoraggio idromorfologico a larga scala combinando dati acquisiti da drone e satellite e su come eventualmente supplire ai limiti emersi nello sviluppo delle metodologie e degli strumenti prodotti.

I contenuti delle relazioni predisposte nell'ambito dell'accordo ISPRA-DEIB saranno utilizzati per la redazione di Linee Guida per l'implementazione a livello nazionale della metodologia sviluppata.

### 5.1 Indicatore 1: mappatura habitat (macro-unità SUM)

Il classificatore basato su dati S2 fornisce la possibilità di mappare le macro-unità morfologiche SUM, consistenti nello specifico in unità sommerse, emerse e vegetazione in alveo e ripariale, all'interno di corridoi fluviali per tutto il territorio nazionale e per tutta la serie storica di immagini di S2 disponibili.

Dai test effettuati il classificatore sviluppato ha una precisione del 94% sul dataset di validazione adottato. Gli errori sono da ritenersi localizzati prevalentemente nelle zone di confine che segnano il passaggio da una macro-unità all'altra dove si concentrano i cosiddetti pixel misti, ossia aree di 10 m x 10 m in cui il ricampionamento si attua su pixel di dimensioni inferiori caratterizzati dall'essere associati a macro-unità di differente natura, per esempio sedimenti e vegetazione. Inoltre, ispezionando a video la sequenza dei *raster* della serie storica prodotta lungo il fiume Po si è constatato che in due date (11/03/2017 e 12/04/2016) una piccola quota parte di pixel appartenenti alle unità sommerse è stata impropriamente classificata come vegetazione (v. [Figura 37](#)). Ciò si è verificato probabilmente a causa della presenza di ombre delle nuvole (visibili nelle foto satellitari a destra in [Figura 37](#)) o di materiale legnoso galleggiante. Si ritiene quindi consigliabile sottoporre ogni *raster* prodotto a una ulteriore validazione visiva al fine di identificare e rimuovere eventuali date in cui il classificatore genera macro-errori dovuti alle specifiche condizioni climatiche e ambientali della data in oggetto. La stabilità del classificatore rispetto al suo impiego in diversi contesti regionali e nelle diverse condizioni di stagionalità merita ulteriori



approfondimenti; tuttavia le analisi svolte generando indicatori mediante aggregazione sia spaziale che temporale delle configurazioni della macro-unità (v. [Capitolo 3](#)) confermano che il classificatore è da ritenersi robusto e dotato di una precisione elevata.

Il classificatore è dunque pronto per essere applicato sui dati Copernicus S2 su tutto il territorio nazionale effettuando contestualmente all'estensione della sua applicazione ulteriori test di stabilità e robustezza. Ovviamente, il riferimento al territorio nazionale riguarda i fiumi aventi un alveo attivo di larghezza > 50 m, compatibilmente con la risoluzione del dato satellitare utilizzato.

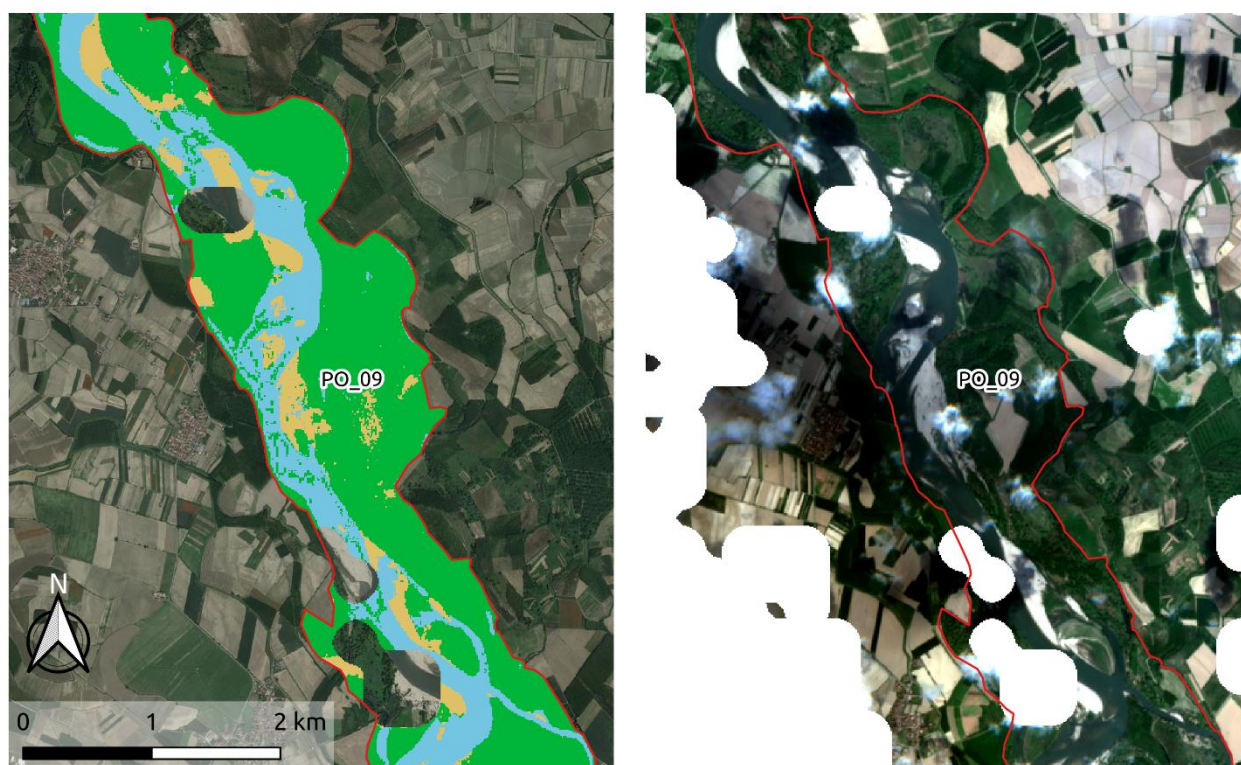


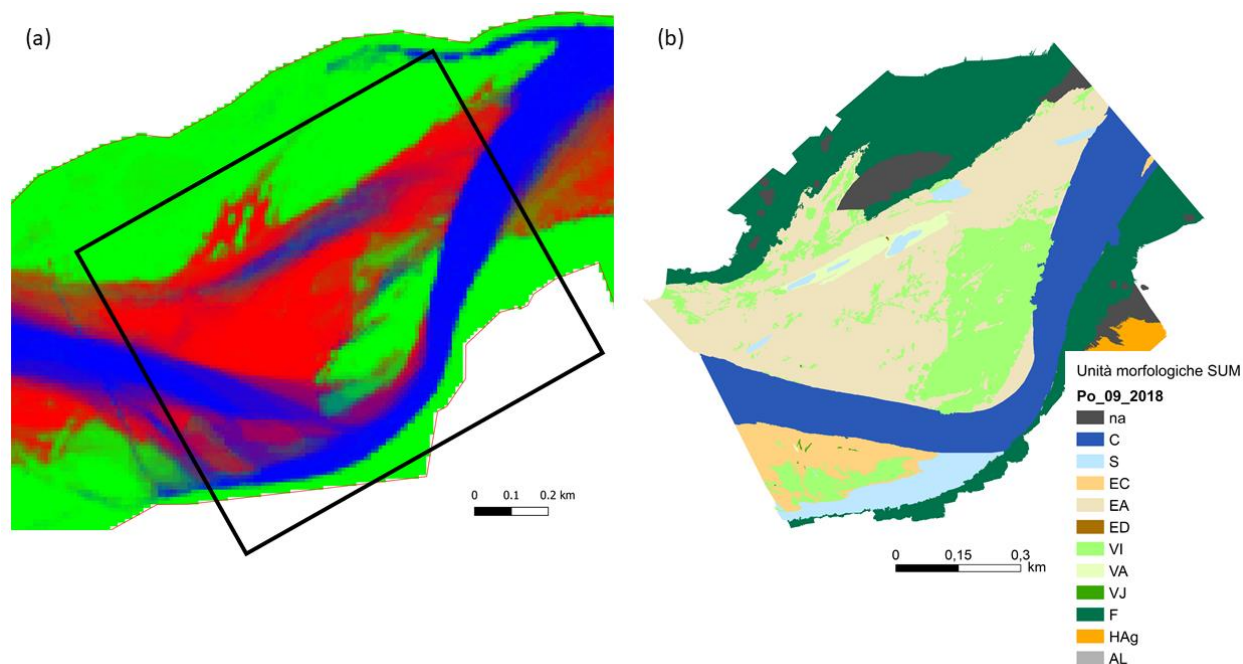
Figura 37 – Classificazione applicata all’acquisizione da S2 relativa alla data del 12/04/2016 lungo il tratto PO\_09: si noti che parte dei pixel appartenenti alle unità sommerse (alveo bagnato, in celeste) è stata classificata come vegetazione in alveo e ripariale (zone in verde, all’interno dell’alveo bagnato) probabilmente dovuta all’ombra delle nuvole o per la possibile presenza di materiale legnoso.

Inoltre, la metodologia proposta di creare verità a terra tramite acquisizioni da drone e di punti target e punti di controllo, è da incoraggiare come attività di routine. Tale attività di monitoraggio idromorfologico, se coordinata in modo appropriato a scala nazionale, permetterebbe di creare un ampio dataset aggiornato e aggiornabile prezioso per la futura calibrazione e validazione del classificatore a scala nazionale, oltre che per la possibilità di creare classificatori più sofisticati capaci di gestire pixel misti e un numero maggiore di classi rispetto alle 3 tipologie di macro-unità morfologiche assunte in questo progetto.

Come già discusso anche nella Relazione tecnica intermedia n. 2 (v. sezione “Classificazione unità morfologiche SUM da ortofoto APR”) la risoluzione spaziale dei dati di S2 non permette la classificazione delle unità morfologiche SUM (livello Base e Dettaglio; Rinaldi et al., 2016b) ma solo delle macro-unità. Le unità morfologiche sono tuttavia classificabili utilizzando le acquisizioni da drone, per cui se queste divenissero attività di routine su tratti selezionati in tutto il territorio nazionale si potrebbe generare anche un dataset unico relativo alla configurazione delle unità morfologiche nel tempo. Questi dati, una volta sistematizzati con la classificazione generalizzata da S2, aprirebbero alla possibilità di studiare il legame fisico tra unità e traiettoria temporale delle macro-unità e degli indici aggregati derivati (v. [Figura 38](#)). La



**Figura 38**, così come le figure riportate nel §2.3, fanno emergere le potenzialità degli strumenti e dei prodotti derivati ai fini della caratterizzazione e del monitoraggio idromorfologico. Esplicitare il legame tra macro-unità e unità morfologiche renderebbe possibile produrre una predizione delle unità anche in assenza di informazioni da drone e aumenterebbe la comprensione dei processi d'alveo a scala nazionale rispondendo alle esigenze della metodologia IDRAIM, delle direttive europee quali la WFD e la FD e più in generale fornendo un'informazione fondamentale a supporto della gestione fluviale in Italia.



**Figura 38** – Esempio di indice aggregato di macro-unità (a), ottenuto combinando le frequenze medie mensili delle classi di macro-unità in un'immagine RGB in falsi colori (rosso=unità emerse; verde=vegetazione in alveo e ripariale; blu=unità sommerse), e relativa configurazione delle unità morfologiche osservata da Drone per il sito del Po (b) (estratto dalla Relazione tecnica intermedia n.2). In (a) il riquadro nero indica la zona classificata a partire da immagini drone mostrata in (b).

Per quanto concerne l'identificazione delle unità sommerse da S1, si è vista l'importanza di questa informazione poiché l'unica capace di registrare il canale bagnato durante le portate più elevate dove informazioni da S2 non sono disponibili a causa della presenza di nuvole. Nel progetto si è sviluppato un tool (STORM) specifico per l'individuazione del canale bagnato da dati S1 (si veda §2.3). Allo stato attuale l'algoritmo ha mostrato alcuni limiti significativi quando applicato su aree estese: infatti, il 20% della serie storica sul Po e sul Sesia non ha prodotto risultati analizzabili poiché non è stato possibile identificare un valore soglia robusto tra unità sommerse e non. In futuri sviluppi della metodologia questo limite potrà essere superato testando diverse finestre di segmentazione dell'area da classificare che verranno processate separatamente dall'algoritmo. Inoltre, anche quando il classificatore individua soglie robuste e classifica correttamente l'immagine, si rilevano sia problemi di sottostima del canale bagnato (v. Figura 11) che di falsi positivi nelle zone con elevata umidità. Questi sono limiti strutturali legati alla fisica del segnale SAR che in zone di bordo tra acqua e sedimento è influenzata principalmente dal sedimento e che in zone molto umide riflette come una superficie bagnata (Chini et al., 2017; Henry et al., 2006; Matgen et al., 2011). Futuri sviluppi del modello dovranno ulteriormente quantificare questi limiti e meglio definire quali stime e applicazioni (per esempio la stima dell'alveo di piena o della portata) potranno essere rese operative e quali no.

## 5.2 Indicatore 3: stima della portata

I test condotti per la valutazione della relazione tra portata e aree delle unità sommerse (alveo bagnato) ottenute da S2 e S1 hanno dimostrato la presenza di un legame significativo e dipendente dalle tipologie fluviali.

I risultati ottenuti sono di estrema rilevanza e aprono all'opportunità di investire su future linee di ricerca finalizzate alla calibrazione di modelli, analoghi a quello individuato nell'ambito di questo progetto, che siano in grado di stimare la portata da misure ripetute nel tempo e nello spazio dell'alveo bagnato. I risultati conseguiti mostrano che con dati della risoluzione spaziale di S1 e S2 questi approcci possono funzionare solo per fiumi con alveo bagnato di larghezza > 50 m. I risultati più soddisfacenti sono stati quelli ottenuti per l'asta del fiume Po con portata media del campione superiore ai 250 m<sup>3</sup>/s. In questo contesto il modello scelto riesce a predire la portata con un errore del 20%, paragonabile ai risultati ottenuti finora in letteratura per i fiumi maggiori a scala mondiale, come il Mississippi o lo Yangtze (Gleason and Smith, 2014). I risultati inoltre sono incoraggianti riguardo alla possibilità di integrare dati da S2 e S1 al fine di avere una più ricca quantità di informazioni soprattutto per le portate maggiori spesso non rilevate da S2 a causa della copertura nuvolosa durante gli eventi di piena (v. [Figura 13](#)).

Per applicazioni future è importante segnalare che esistono diversi prodotti satellitari con risoluzioni spaziali dell'ordine del metro (e.g., *WorldView*, *Pleiades*) che potrebbero essere utilizzati per l'estrazione dell'alveo bagnato e che potrebbero permettere di estendere le applicazioni di modelli di stima delle portate anche a fiumi di minori dimensioni. L'opportunità di una loro applicazione nel contesto nazionale italiano potrebbe avere, dunque, un'indubbia utilità nel contesto della gestione della risorsa idrica. Un progetto specifico per la stima delle portate da immagini satellitari potrebbe essere utile per creare un maggior numero di casi studio raccogliendo dati su fiumi grandi e piccoli consentendo di definire e calibrare modelli di stima delle portate generalizzabili a scala di bacino e per tipologia fluviale. È infatti plausibile pensare che i legami tra la portata e l'area del canale bagnato e attributi associati, quali la larghezza e la forma dell'alveo, siano funzioni delle specifiche condizioni climatiche, idrologiche e geomorfologiche del bacino e della tipologia di alveo in esame (Bizzi et al., 2018; Parker et al., 2007).

## 5.3 Indicatore 4: delineaazione larghezza alveo di piena

L'integrazione delle mappature delle unità sommerse ottenute dai classificatori S1 e S2 permette di generare informazioni a cadenza settimanale sull'estensione dell'alveo bagnato. Questa informazione integrata nel tempo permette di produrre mappe di frequenza, come quelle proposte in [Figura 15](#), che consentono di identificare l'alveo di piena e di ipotizzare la posizione e l'estensione dell'alveo attivo e della piana inondabile (v. [Figura 16](#)). Più in generale tali mappe permettono di rappresentare la dinamica "idrologica" (legata cioè al regime delle portate) dell'alveo che può essere utilizzata in numerose applicazioni, quali ad esempio, la gestione della risorsa e la caratterizzazione degli habitat fisici e del rischio idraulico, oltre a contribuire ad aggiornare in modo semi-automatico le maschere dei corridoi fluviali. Infatti, una volta determinata manualmente la maschera del corridoio fluviale si potrebbero monitorare quelle zone occupate da unità sommerse o emerse che sono a contatto diretto con i limiti del corridoio stesso (ossia, quelle porzioni di alveo non a contatto con la vegetazione in alveo o ripariale ma a contatto diretto con le macro-unità di pianura alluvionale "zone dominate da attività antropiche"; Rinaldi et al., 2016b). Si potrebbe per esempio identificare un *buffer* nell'intorno di queste aree e valutare la frequenza di sommersione dei pixel appartenenti al *buffer* stesso (che in teoria si troverebbe al di fuori dell'alveo di piena). Frequenze di sommersione maggiori di quelle che ci si attende per questi pixel supportano l'ipotesi di un processo erosivo in corso e quindi la necessità di includere tali pixel nel corridoio fluviale.

#### 5.4 Indicatori 2 e 5: caratterizzazione del substrato e indicatori di dinamica morfologica

Riguardo la granulometria (v. [§4.1](#)), i risultati conseguiti nella predizione del diametro mediano (D50) da dati S2 mostrano buone potenzialità del modello implementato, con un errore medio inferiore agli 8 mm. Sebbene il significato fisico del ruolo che le varie bande spettrali hanno nel modello proposto e quindi la generalizzabilità del modello stesso richiedano ulteriori approfondimenti, i risultati conseguiti aprono alla possibilità di mappare su larga scala la granulometria dei sedimenti esposti in fiumi di dimensioni medio grandi (caratterizzati da barre di sedimento emerso con una dimensione superiore a 100 m<sup>2</sup>) in un *range* che va da ciottoli, a ghiaia, a sabbia. Il modello proposto mostra tuttavia limiti per granulometrie superiori ai 50 mm. In sviluppi futuri per ovviare a questo limite si suggerisce di esplorare le correlazioni tra diametro medio e intensità del segnale di S1 (o eventualmente di Cosmo SkyMed). Avendo il segnale SAR una lunghezza d'onda dell'ordine dei cm (nello specifico  $\lambda = 3$  cm per S1), è probabile che sia influenzato dalle caratteristiche fisiche e geometriche delle superfici con granulometria grossolana (superiori ai 50 mm), ossia dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda del segnale (Bürgmann et al., 2000; Ferretti et al., 2001; Rosen et al., 2000). Infatti, l'intensità del *backscattering* aumenta quando la rugosità è maggiore della lunghezza d'onda e l'aumento è tanto maggiore quanto maggiore è la rugosità. Con molta probabilità, l'integrazione del segnale SAR e di quello multispettrale si dimostrerà l'approccio più completo e robusto nella stima del diametro medio, al fine di rendere identificabile un ampio *range* di classi granulometriche.

Per quanto riguarda le potenzialità dei dati SAR nel discriminare i processi morfologici d'alveo sono stati condotti dei test utilizzando sia la coerenza che l'intensità dei dati da S1. L'analisi della coerenza rispetto alle variazioni morfologiche osservate sulla barra del fiume Po ha permesso di evidenziare abbassamenti di coerenza in corrispondenza di eventi che hanno portato modifiche rilevanti nelle caratteristiche morfologiche della barra (v. [§4.2.1](#)). Anche l'analisi del segnale di intensità ha mostrato una certa sensibilità alle variazioni morfologiche osservate (si veda [Figura 35](#)) che sul sito del Po si è manifestata attraverso una diminuzione nel valore di intensità su tutta la barra.

Futuri approfondimenti dovrebbero aumentare il numero di casi studio dove variazioni morfologiche significative siano monitorate tramite acquisizioni drone sequenziali e così aumentare il numero di analisi capaci di investigare quali siano i fattori e i processi che influenzano maggiormente le variazioni di coerenza e intensità, nel contesto di dinamiche d'alveo analoghe a quelle analizzate. Si tratta di un argomento poco investigato nell'attuale letteratura SAR e assente dalla letteratura in ambito fluviale e che a maggior ragione merita ulteriori studi, almeno per quanto noto agli autori. Tali sviluppi, ad oggi solo ipotizzabili, aprirebbero allo studio delle dinamiche morfologiche (topografiche) d'alveo da satellite, un'attività che avrebbe, potenzialmente, enormi ricadute nel campo del monitoraggio fluviale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della dinamica morfologica in termini di variazioni planimetriche, si rimanda alla discussione sugli indicatori 1 e 4 (v. [§5.1](#) e [5.3](#)).

## 5.5 Operatività e fattibilità del monitoraggio idromorfologico a scala nazionale basato su dati Copernicus e acquisizioni da drone

Il presente progetto ha dimostrato che tramite l'integrazione dei dati satellitari Copernicus, in particolare multispettrali (S2) e SAR (S1), con i dati acquisiti da drone lungo tratti fluviali selezionati dell'estensione di 500–1000 m, è possibile generare una vasta gamma di informazioni a supporto della caratterizzazione idromorfologica dei corsi d'acqua. In particolare, è possibile produrre informazioni settimanali e mensili riguardo la traiettoria delle macro-unità morfologiche. Mappe di frequenza di tali macro-unità forniscono importanti indicazioni, fino ad oggi non disponibili, circa la caratterizzazione morfologica delle tipologie di corsi d'acqua maggiori ai fini dell'interpretazione delle dinamiche d'alveo (v. [§2.3](#) e [Capitolo 4](#)). Combinando le informazioni sulle frequenze delle unità sommerse rilevabili da S2 e S1 con quelle delle altre macro-unità, è possibile generare nuovi strati informativi a supporto dell'identificazione dell'alveo di piena e l'alveo attivo fornendo un efficace strumento conoscitivo per la gestione della risorsa idrica e della caratterizzazione degli habitat fisici e del rischio idraulico.

L'attività svolta nell'ambito di questo accordo ha mostrato la necessità di costruire dataset di verità a terra dotati di adeguata risoluzione e precisione spaziale tramite acquisizione da drone e geolocalizzazione fine tramite strumento GPS. Il lavoro di campo non è opzionale in quanto i soli dati satellitari processati "da scrivania" non consentono di generare informazioni robuste per la calibrazione e validazione dei modelli proposti. I dati da drone permettono di calibrare più efficacemente (cioè includendo pixel di zone di confine tra macro-unità con maggiore precisione) il classificatore e ottenere una stima più realistica dell'accuratezza. La metodologia adottata in questo accordo è inoltre "aperta", nel senso che è pensata per poter integrare nuove acquisizioni da drone ogni volta che queste vengano effettuate, cosa che si concilia con una successiva implementazione operativa sull'intero territorio nazionale. Tali acquisizioni inoltre sarebbero utili sia per la validazione su altri bacini fluviali dei modelli sviluppati nell'ambito dell'accordo, sia per definire aggiornamenti e integrazioni di tali modelli, producendo nuove calibrazioni basate su dataset più ricchi quali quelli generati da un monitoraggio operativo a scala di bacino per l'intero territorio nazionale.

La metodologia adottata mostra di essere non solo efficace ma anche in grado di supportare l'integrazione di ulteriori dataset di maggiore dettaglio su tutti i tratti monitorati da drone. Nei tratti monitorati da drone è infatti possibile, grazie alla risoluzione delle ortofoto prodotte, dettagliare la caratterizzazione delle unità morfologiche (la scala gerarchicamente inferiore rispetto alle macro-unità), ovvero al di là delle superfici aggregate discusse in questa relazione (alveo di piena, alveo attivo, estensione della piana inondabile), per provare a metterla in relazione con le traiettorie delle macro-unità da satellite al fine di comprendere il legame tra rappresentazioni prodotte alle due diverse scale (v. [Figura 38](#)). Poter esplicitare questo legame, una volta integrato il dataset di calibrazione con ulteriori acquisizioni su tutto il territorio nazionale, potrebbe portare alla creazione di predittori di configurazione delle unità morfologiche basati sulle macro-unità estratte da dati satellitari per le varie tipologie fluviali anche laddove non fossero disponibili dati da drone.

Nei tratti monitorati con drone è possibile generare anche informazioni sulla distribuzione granulometrica superficiale. Essa qualora fosse presente su tratti caratteristici all'interno di un bacino costituirebbe una importante base informativa per il calcolo del trasporto solido (Brenna et al., 2019; Mueller and Pitlick, 2014), per l'interpretazione dei processi d'alveo e per la caratterizzazione e il monitoraggio degli habitat fisici (Hauer et al., 2018). Inoltre, fornirebbe dati preziosi per la ulteriore calibrazione e validazione degli indicatori 2 e 5 da satellite, al fine di migliorare la caratterizzazione del substrato e delle dinamiche d'alveo.

D'altra parte, i limiti della metodologia sviluppata derivano più che altro dalla risoluzione spaziale dei dati satellitari che, nonostante sia migliorata negli ultimi anni, è ancora compresa tra i 10 e i 20 m. Ciò

implica che attualmente tale metodologia può essere applicata ai soli corsi d'acqua con alveo attivo di larghezza maggiore di 50 m (e alveo bagnato maggiore di 50 m per gli indicatori che riguardano la stima dell'alveo bagnato da S1 e S2), precludendone, al momento, l'utilizzo alla gran parte dei bacini montani, dove tuttavia resta la possibilità di utilizzare le acquisizioni da drone per la caratterizzazione di dettaglio di tratti specifici. In questo contesto, a integrazione delle acquisizioni da drone, si potrebbero pianificare voli aerei che acquisiscano immagini multispettrali o dati Lidar (Demarchi et al., 2017). Informazioni di questo genere qualora siano in grado di generare ortofoto centimetriche e DEM con precisioni verticali dell'ordine dei cm potrebbero sostituire o integrare l'informazione acquisita da drone. Sebbene tali acquisizioni siano fra le più costose e l'elaborazione dei dati sia molto più complessa, occorre sottolineare che esse hanno il vantaggio di coprire zone molto più ampie, fino a interi bacini, e quindi permetterebbero di coprire il *gap* attualmente lasciato dai dati satellitari Sentinel a risoluzione 10-20 m. Un'ulteriore base dati di cui è possibile e auspicabile l'integrazione è data dalle acquisizioni da satelliti dotati di precisione inferiore al metro (ad es., *Pleiades* e *WorldView*). Si tratta di piattaforme che acquisiscono nell'ottico e nel multispettrale, e in alcuni casi anche in visione stereoscopica, aprendo così alla possibilità di generare DEM. I dati provenienti da tali piattaforme presentano al momento una duplice limitazione: da un lato, essi sono a pagamento, con costi generalmente piuttosto elevati; dall'altro, se le ortofoto così acquisite presentano un elevato valore aggiunto per la mappatura di unità e macro-unità morfologiche, i DEM così generati presentano precisioni verticali difficili da stimare, che spesso superano il metro. Ne consegue che per i prossimi anni l'integrazione dei dati Copernicus disponibili gratuitamente con i dati derivanti da acquisizioni *low-cost* mediante drone sia l'approccio al monitoraggio fluviale più efficace ed economico. Una volta sistematizzati, nulla vieta la loro ulteriore integrazione con dati ottici, multispettrali e Lidar derivanti da voli aerei specifici (ad es., quelli effettuati subito dopo un evento alluvionale).

In sintesi le metodologie proposte nell'ambito dell'accordo restano applicabili alla stragrande maggioranza dei fiumi vallivi ovvero sui fiumi di medio-grandi dimensioni presenti sul territorio italiano. Si noti, infatti, che secondo la descrizione di Strahler, i fiumi di ordine  $\geq 4$ , ovvero includendo le tipologie di fiumi studiati nell'ambito del presente accordo di collaborazione ISPRA-DEIB, rappresentano circa il 14% del reticolo nazionale (fonte dati <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-catchments-and-rivers-network#tab-data>). Questi fiumi che includono tutti i maggiori sistemi fluviali italiani sono candidabili ad essere monitorati in modo semi-automatico con le metodologie proposte.

Per i suddetti fiumi, nell'ambito delle future sperimentazioni a livello nazionale si propongono i seguenti passi operativi:

- i) generare una maschera del fondo valle (ossia la pianura alluvionale) processando il DEM nazionale (ad es., 20 m x 20 m) tramite il toolbox *Fluvial Corridor* (Roux et al., 2015);
- ii) applicare i classificatori S2 e S1 nella maschera del fondo valle e successivamente generare i *raster* di frequenza delle unità sommerse, delle unità emerse e delle unità della vegetazione ripariale. Le frequenze devono essere calcolate almeno su un arco temporale di alcuni anni, ad es. gli ultimi 3-5 anni a partire dall'ultima osservazione disponibile, al fine di caratterizzare le dinamiche recenti. Operativamente si consiglia di applicarlo a tutta la serie storica disponibile per i dati S2 e S1;
- iii) generare, per una prima identificazione del corridoio fluviale, dell'alveo di piena e dell'alveo attivo, le aree corrispondenti a frequenze delle unità sommerse minime per il corridoio fluviale, comprese tra 0.01 e 0.03 per l'alveo di piena e tra 0.05 e 0.15 per l'alveo attivo. Si sottolinea che la scelta dei valori di soglia di frequenza da applicare per l'identificazione del corridoio fluviale e dei suddetti alvei dipende dal numero di osservazioni disponibili. Pertanto, la sistematizzazione e generalizzazione ai corsi d'acqua delle soglie come definite sopra richiedono ulteriori test caso specifici. Ove necessario, al fine di eliminare eventuale errori derivanti dalla automatizzazione della procedura, occorre procedere a una modifica manuale del corridoio fluviale e degli alvei, che



potrebbero per esempio non includere aree geomorfologicamente attive e che tuttavia nelle acquisizioni disponibili non risultano mai sommerse. Tale tipo di attività richiede necessariamente una validazione esperta che deve essere eseguita da parte di un geomorfologo. L'identificazione del corridoio fluviale e degli alvei di piena e attivo da satellite, sebbene non completamente automatizzata, permetterà di rendere molto più efficiente la delimitazione degli stessi diminuendo drasticamente il lavoro finora svolto manualmente "da scrivania" e consentendo così la generazione di strati informativi aggiornabili, fino ad oggi non disponibili;

- iv) calcolare gli indicatori proposti per lo studio delle traiettorie delle macro-unità (v. §3.3) per definire le diverse tipologie fluviali presenti e quantificare le loro caratteristiche morfologiche a supporto di protocolli di caratterizzazione idromorfologica, quali IDRAIM. Ciò renderebbe meno onerosa e più quantificabile la loro definizione;
- v) sviluppare ulteriormente il modello superficie bagnata-portate su più tipologie fluviali, laddove siano disponibili dati di portata, mediante le informazioni giornaliere sulle unità sommerse ottenute al punto ii (v. §3.1). Questo permetterebbe di verificare la fattibilità di implementare operativamente un predittore delle portate basato su dati satellitari;
- vi) effettuare nuove acquisizioni da drone (includendo georeferenziazione di precisione con GPS e fotogrammetria) su bacini rappresentativi di diverse tipologie fluviali al fine di generare una base dati di verità a terra che consenta:
  - a. l'ulteriore validazione del classificatore nei nuovi bacini di applicazione e l'eventuale ricalibrazione basati sui nuovi dati di verità a terra ottenibili con i dati acquisiti da drone;
  - b. l'ulteriore sviluppo del modello di stima della granulometria media da S2 (v. §4.1) e l'eventuale integrazione con dati S1;
  - c. l'esplorazione del legame fisico ipotizzato tra le traiettorie nel tempo delle macro-unità morfologiche desunte da S2 e la configurazione spaziale delle unità morfologiche visibili dalle ortofoto da drone;
  - d. di testare le potenzialità dei dati S1 nel monitoraggio di dinamiche d'alveo significative, come quella osservata sul sito del Po (v. §4.2), ad oggi solo ipotizzabili in base ai risultati sinora ottenuti.

In sintesi, l'utilizzo congiunto di dati satellitari Copernicus e di acquisizioni da drone rende possibile disporre di uno strumento di monitoraggio multi-scala, che va dall'informazione di dettaglio raggiungibile sul tratto dell'ordine del cm/mm fino all'informazione a larga scala ottenibile da satellite con copertura dell'ordine delle centinaia di km, permettendo altresì una integrazione di scale spaziali e temporali che oltre a caratterizzare un tratto specifico di un corso d'acqua fornisce elementi utili a generalizzare l'informazione all'intero bacino.

Rendere sistematiche a livello regionale le acquisizioni da drone, a integrazione dei rilievi di campo condotti per l'applicazione del metodo IDRAIM, e implementare in modalità operativa a scala nazionale le metodologie definite in questo accordo permetterebbero la creazione di un sistema innovativo di monitoraggio fluviale nazionale. Si avrebbe, così, la possibilità di usufruire di un sistema aperto e aggiornabile a scadenze mensili con i più recenti dati satellitari e le nuove acquisizioni da drone capace di generare nuovi e preziosi strati informativi a supporto dell'implementazione delle Direttive Quadro sulle Acque e Alluvioni, fornendo per altro uno strumento interpretativo e previsionale delle dinamiche d'alveo presenti e future. Oltre alle applicazioni relative alla definizione ed evoluzione delle unità e macro-unità morfologiche, mediante questo sistema potrebbero essere fornite informazioni analoghe sulle caratteristiche del substrato (granulometria media utilizzando il solo dato satellitare ed esaustiva laddove fossero disponibili anche i dati da drone) e sulla stima del *sediment budget* in tratti critici con acquisizioni sequenziali da drone. Inoltre, in un prossimo futuro questo sistema potrebbe fornire un valido supporto per

migliorare la valutazione da satellite delle portate (indicatore 3) e dei processi d'alveo (indicatori 2 e 5). Tale ampia base di dati potrebbe, inoltre, essere utilmente impiegata nei modelli di connettività del sedimento a scala di reticolo proposti dalla recente letteratura scientifica (Czuba and Foufoula-Georgiou, 2014; Schmitt et al., 2018a, 2018b). Si tratta di una tipologia di modelli in grado di stimare flussi, caratteristiche e provenienza dei sedimenti in ogni tratto del reticolo studiato e di stimare l'impatto di diverse possibili alternative gestionali, quali la costruzione di sbarramenti o dighe o l'implementazione di strategie alternative di gestione dei sedimenti a scala di bacino. Fino ad oggi il fattore limitante per l'applicazione di tali modelli è stato la loro validazione, poiché dati sulla granulometria, sul trasporto solido, sulle forme e processi fluviali sono raramente disponibili e, quando lo sono, riguardano aree limitate e non sono sistematizzati a scala di bacino, a eccezione di qualche esempio al di fuori del territorio nazionale (Piégay et al., 2019). L'approccio al monitoraggio idromorfologico proposto in questo lavoro, se sistematizzato a scala di bacino, permetterebbe di generare una base dati ideale per l'implementazione di tali modelli favorendo una sinergia tra la mappatura delle forme fluviali e la valutazione della connettività idromorfologica, supportando una più profonda comprensione del sistema fluviale e delle sue dinamiche. Questo sviluppo avrebbe delle ricadute significative sulla capacità di predire l'evolversi di futuri processi e assetti fluviali, particolarmente rilevante in relazione agli impatti prodotti dai cambiamenti climatici e dalla crescente pressione antropica sul territorio e alle conseguenti ricadute sulle attività gestionali e di pianificazione.

Ovviamente, la possibilità di rendere operativo un tale sistema per il monitoraggio idromorfologico dei corsi d'acqua medio-grandi dipende dall'assunzione di una strategia nazionale di lungo periodo (attraverso, ad es., la *Space Economy* nazionale), basata sull'utilizzo sistematico delle acquisizioni satellitari rese disponibili gratuitamente dal programma EU Copernicus. Ciò non richiederebbe uno sforzo di molto superiore a quello che già viene sostenuto di routine dalle varie istituzioni italiane che utilizzano i dati Copernicus, a maggior ragione se un tale servizio fosse erogato a livello nazionale.

Si sottolinea altresì come il monitoraggio da drone richieda una spesa piuttosto contenuta<sup>4</sup> e comportamenti ridotti, dell'ordine di poche settimane, per l'addestramento al pilotaggio. Inoltre, questo addestramento è sempre più richiesto e svolto anche per altre attività condotte dagli istituti preposti alla gestione ambientale e territoriale. L'auspicio è creare sinergie tra i diversi tipi di monitoraggio idrologico e idromorfologico ottimizzando l'organizzazione del lavoro e delle risorse disponibili. È un dato di fatto che i recenti sviluppi tecnologici abbiano a tal punto incrementato la quantità e la qualità dei dati generati per l'osservazione dell'ambiente da rendere la loro sistematizzazione e integrazione a varie scale spaziali e temporali la vera sfida da affrontare, oltre che un elemento necessario e fondamentale per trasformare questi dati in conoscenza, e specificamente in una maggiore comprensione del territorio e dei suoi processi geomorfologici ed ecologici (Piégay et al., 2019). I vantaggi diretti e indiretti per la società potrebbero essere rivoluzionari in termini di salvaguardia del nostro ambiente, sfruttamento sostenibile delle risorse e protezione dagli eventi estremi del ciclo idrologico.

Alcune delle linee di progetto intraprese in questo accordo saranno ulteriormente sviluppate nell'ambito delle attività di ricerca e servizio che sono condotte in relazione all'applicazione e all'aggiornamento del protocollo IDRAIM e dei suoi derivati da parte degli enti coinvolti nella definizione di tale protocollo.

---

<sup>4</sup> Il costo del drone utilizzato nelle acquisizioni sui tratti campione, comprensivo degli accessori e del software necessario al pilotaggio e alla definizione dei piani di volo, si aggira intorno ai duemila euro. A questo importo si devono aggiungere i costi eventualmente necessari per la formazione di piloti di Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) e per la copertura assicurativa, secondo l'attuale normativa nazionale ed europea. A tali costi devono essere poi aggiunti quelli per l'acquisto di uno strumento GPS per la correzione centimetrica delle acquisizioni da drone, laddove non sia già disponibile, per un importo di base di circa ventimila euro.

## Bibliografia

- Belletti B, Rinaldi M, Bussetini M, Comiti F, Gurnell AM, Mao L, Nardi L, Vezza P. 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology* 283: 143–157.
- Bizzi S, Piégay H, Demarchi L, Van de Bund W, Weissteiner CJ, Gob F. 2018. LiDAR-based fluvial remote sensing to assess 50-100-year human-driven channel changes at a regional level: The case of the Piedmont Region, Italy: Fluvial remote sensing to assess human-driven channel changes. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.4509.
- Brenna A, Surian N, Mao L. 2019. Virtual Velocity Approach for Estimating Bed Material Transport in Gravel-Bed Rivers: Key Factors and Significance. *Water Resources Research* 55: 1651–1674. DOI: 10.1029/2018WR023556.
- Brivio PA, Lechi G, Zilioli E. 2006. *Principi e metodi di Telerilevamento*. Città Studi Edizioni.
- Bürgmann R, Rosen PA, Fielding EJ. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 28: 169–209. DOI: 10.1146/annurev.earth.28.1.169.
- Cavalli M, Marchi L. 2008. Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 323–333. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-323-2008>.
- Chini M, Hostache R, Giustarini L, Matgen P. 2017. A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55: 6975–6988. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2737664.
- Czuba JA, Fofoula-Georgiou E. 2014. A network-based framework for identifying potential synchronizations and amplifications of sediment delivery in river basins. *Water Resources Research* 50: 3826–3851. DOI: 10.1002/2013WR014227.
- Demarchi L, Bizzi S, Piégay H. 2017. Regional hydromorphological characterization with continuous and automated remote sensing analysis based on VHR imagery and low-resolution LiDAR data: REGIONAL RS-BASED HYMO CHARACTERIZATION. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 531–551. DOI: 10.1002/esp.4092.
- Durand M et al. 2016. An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope. *Water Resources Research* 52: 4527–4549. DOI: 10.1002/2015WR018434.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* 39: 13.
- Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F, Massonnet D. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8.
- Gleason CJ, Smith LC. 2014. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 4788–4791. DOI: 10.1073/pnas.1317606111.
- Hauer C, Leitner P, Unfer G, Pulg U, Habersack H, Graf W. 2018. The Role of Sediment and Sediment Dynamics in the Aquatic Environment. In *Riverine Ecosystem Management*, Schmutz S and Sendzimir J (eds). Springer International Publishing: Cham; 151–169. [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-73250-3\\_8](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-73250-3_8).
- Henry J-B, Chastanet P, Fellah K, Desnos Y-L. 2006. Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1921–1929. DOI: 10.1080/01431160500486724.

Lonjou V, Desjardins C, Hagolle O, Petrucci B, Tremas T, Dejus M, Makarau A, Auer S. 2016. MACCS-ATCOR joint algorithm (MAJA). presented at the Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXI. 1000107 pp. 19. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10001/1000107/MACCS-ATCOR-joint-algorithm-MAJA/10.1117/12.2240935.short>.

Louppe, G., Wehenkel, L., Sutera, A., Geurts, P., 2013. Understanding variables importance in Forests of randomized trees, in the Proceedings of Advances in neural information processing systems 26, NIPS 2013, <https://papers.nips.cc/paper/4928-understanding-variable-importances-in-forests-of-randomized-trees.pdf>.

Matgen P, Hostache R, Schumann G, Pfister L, Hoffmann L, Savenije HHG. 2011. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 36: 241-252. DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.009.

Mueller ER, Pitlick J. 2014. Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 2. Single thread to braided transitions. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 119: 1516-1541. DOI: 10.1002/2013JF003045.

Parker G, Wilcock PR, Paola C, Dietrich WE, Pitlick J. 2007. Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 112. DOI: 10.1029/2006JF000549.

Piégay H, Arnaud F, Belletti B, Bertrand M, Bizzi S, Carbonneau P, Duour S, Liébault F, Ruiz-Villanueva V, Slater L. 2019. Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects. Earth Surface Processes and Landforms. DOI:10.1002/esp.4787.

Rice S. 1999. The nature and controls on downstream fining within sedimentary links. Journal of Sedimentary Research 69: 32-39. DOI:10.2110/jsr.69.32.

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

Rinaldi M, Belletti B, Comiti F, Nardi L, Mao L, Bussettini M. 2015. Sistema di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche dei corsi d'acqua (SUM). ISPRA, Manuali e Linee Guida 122/2015. Roma, aprile 2015.

Rinaldi M, Surian N, Comiti F, Bussettini M. 2016a. IDRAIM: Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Versione aggiornata 2016 – ISPRA, Manuali e Linee Guida 131/2016. Roma, gennaio 2016.

Rinaldi M, Belletti B, Comiti F, Nardi L, Mao L, Bussettini M. 2016b. Sistema di rilevamento e classificazione delle unità morfologiche dei corsi d'acqua (SUM) – Versione aggiornata 2016 – ISPRA, Manuali e Linee Guida 132/2016. Roma, gennaio 2016.

Rosen PA, Hensley S, Joughin IR, Li FK, Madsen SN, Rodríguez E, Goldstein RM. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. PROCEEDINGS OF THE IEEE 88: 50.

Roux C, Alber A, Bertrand M, Vaudor L, Piégay H. 2015. “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. Geomorphology 242: 29-37. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.018

Schmitt RJP, Bizzi S, Castelletti A, Kondolf GM. 2018a. Improved trade-offs of hydropower and sand connectivity by strategic dam planning in the Mekong. Nature Sustainability 1: 96-104. DOI: 10.1038/s41893-018-0022-3.

Schmitt RJP, Bizzi S, Castelletti AF, Kondolf GM. 2018b. Stochastic Modeling of Sediment Connectivity for Reconstructing Sand Fluxes and Origins in the Unmonitored Se Kong, Se San, and Sre Pok Tributaries of the Mekong River. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 123: 2-25. DOI: 10.1002/2016JF004105.

Surian N. 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. Geomorphology 43: 137-149. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00127-1.

