



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 INTERMEDIA N.2 IN MERITO AL PROCESSING DELLE IMMAGINI DA DRONE E AI PRIMI RISULTATI S2 E S1

ISPRA

Stefano Mariani
(Responsabile ISPRA dell'Accordo)
Martina Bussettini
Marco Casaioli
Barbara Lastoria
Francesca Piva

DEIB

Andrea Castelletti
(Responsabile DEIB dell'Accordo)
Simone Bizzi
Barbara Belletti
Giulia Marchetti
Francesco Asaro
Claudio Prati
Patrice Carbonneau

Gennaio 2019

Sommario

Premessa	6
Introduzione	6
Stato di avanzamento delle attività	8
Quadro metodologico complessivo	11
Creazione del dataset per la verità a terra (Task 1)	14
Rilievi di campo (T1.1)	14
Acquisizione immagini da APR: Piani di volo	14
Rilievo punti GPS	16
Processamento immagini: Estrazione ortofoto e DEM su PhotoScan (T1.4)	18
STEP 1: <i>Add photos</i>	19
STEP 2: <i>Alignement</i>	21
STEP 3: <i>GPS points inclusion</i>	22
STEP 4: <i>Optimization cameras</i>	25
STEP 5: <i>Build Dense Cloud</i>	25
STEP 6: <i>Build DEM</i>	26
STEP 7: <i>Build Orthomosaic</i>	27
STEP 8: <i>Export orthomosaic and DEM</i>	28
Validazione e accuratezza risultati	28
Analisi dei rischi	31
Classificazione macro-unità da ortofoto drone (T1.2)	31
Segmentazione ortofoto	32
Classificazione ortofoto	33
Classificazione unità morfologiche SUM da ortofoto APR	33
Calcolo granulometria (T1.3)	35
Classificazione macro-unità da Sentinel-2 (Task 2.2 e in parte T4.1)	38
I dati Sentinel-2	38
Obiettivo della Classificazione	38
Classificatore S2	39
Classificatore: calibrazione	39
Classificatore: validazione	41
Applicazione: limiti e opportunità	45
STORM: SenTinel-1 (One) River Mapping toolbox	47
Introduzione	47

Base fisica del classificatore	47
Filtraggio.....	47
Algoritmo per la classificazione dell'area bagnata	48
Presentazione del toolbox.....	52
Dati di Input.....	53
Autoconfigurazione	53
Pre-processing	53
Classificazione	54
Post-processing	55
Configurazione ed esecuzione del Toolbox.....	56
Installazione e Dipendenze	56
Esecuzione del toolbox	56
Validazione.....	58
Discussione	60
Limiti generali	60
Limiti tecnici.....	62
Avanzamento delle attività: step futuri	64
Bibliografia.....	66
APPENDICE I.....	68
Sito: PO_2018_09	68
Sito: SA_2018_09	69
Sito: SC_2018_09.....	70
Sito: SA_2018_04.....	71
Sito: SC_2018_04.....	72
Sito: PO_2017_09	73
Sito: SA_2017_09	74
Sito: SC_2017_07	75
Sito: AC_2018_07.....	76
Sito: AL_2018_07	77
Sito: OR_2018_07	78
Sito: AC_2017_09.....	79
Sito: AL_2017_09	80
Sito: OR_2017_09	81
Sito: BM_2018_10	82
Sito: BV_2018_10.....	83

Sito: BM_2017_11	84
Sito: BV_2017_11	85

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>	7
Tabella 2 – Sintesi delle campagne di misura per la creazione del dataset per la verità a terra.	8
Tabella 3 – Estratto del Survey Report per il punto target p1 nel sito C2. Legenda: PDOP, <i>Position Dilution of Precision</i> ; GDOP, <i>Geometric Dilution of Precision</i> ; HDOP, <i>Horizontal Dilution of Precision</i> ; VDOP, <i>Vertical Dilution of Precision</i>	18
Tabella 4 – Precisione di georeferenziazione dei punti di controllo (da progetto PhotoScan) e dei punti di validazione (da progetto in <i>Cloud Compare</i>) per le 18 acquisizioni elaborate. Legenda: ND, Non disponibile.	30
Tabella 5 – Parametri utilizzati per la segmentazione di ciascuna ortofoto su GRASS (tool <i>i.segment</i>). Legenda: SA, Sesia Arborio; SC, Sesia Caresana; PO, Po; AC, Acquapendente; AL, Alleronia; OR, Orvieto; BM, Bonamico Monte; BV, Bonamico Valle. Per le date delle campagne di misura si veda la <i>Tabella 2</i>	33
Tabella 6 – Bande spettrali, lunghezze d’onda e risoluzione spaziale per le immagini Sentinel-2.	38
Tabella 7 – Estratto della matrice di calibrazione del modello: riporta le bande spettrali usate come predittori e la verità a terra (colonna Ground-Truth, GT) derivata dall’ortofoto APR ricampionata a 10 m (si veda anche la <i>Figura 29</i>).	40
Tabella 8 – Data di acquisizione delle immagini APR e S2 utilizzate per la calibrazione del modello. TMR, TMQ, TQN, SWC corrispondono al nome dei Tiles S2 utilizzati.	41
Tabella 9 – Indicatori <i>Precision</i> , <i>Recall</i> e <i>f1-score</i> e numero di pixel, riportati per ogni unità classificata e come media totale ottenuta per i due modelli S2_10m e S2_20m.	43
Tabella 10 – Date di acquisizione APR e S1.	58
Tabella 11 – Risultati di validazione per ogni acquisizione in termini di accuratezza globale e F1-Score.	60

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. I rilievi di campo T1.1 nel 2019 si intendono a eventuale integrazione ove necessario.	7
Figura 2 – Posizione dei tratti campione nei Distretti Idrografici italiani: P1–P3 nel Distretto Idrografico del fiume Po; T1 nel Distretto Idrografico delle Alpi Orientali; L1–L3 nel Distretto Idrografico dell’Appennino Centrale; C1–C2 nel Distretto Idrografico dell’Appennino Meridionale.	9
Figura 3 – 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 finora e i primi prodotti intermedi estratti a seguito delle prime due fasi del lavoro, descritti nella presente Relazione tecnica intermedia n. 2. M1 e M2 corrispondono alle Milestone indicate in <i>Figura 1</i>	10
Figura 4 – Diagramma di flusso riassuntivo dei vari step della metodologia per la generazione di dati di verità a terra per la calibrazione e validazione dei prodotti (Task 1). Gli step intermedi indicati con il simbolo *, pur non essendo inizialmente previsti dal presente accordo (v. Piano delle attività), sono stati	

comunque prodotti per testare una più ampia applicazione della metodologia alle aree di pianura circostanti il corridoio fluviale.	12
Figura 5 – Esempio di posizionamento di un punto target da rilevare con GPS di precisione.....	16
Figura 6 – Disposizione dei punti GPS secondo linee parallele tra loro e perpendicolari alla direzione della corrente nel sito sul Po nel settembre 2018 (acronimo PO_2018_09).....	17
Figura 7 – Schema a blocchi di sintesi delle operazioni di processamento delle immagini da drone su PhotoScan.	19
Figura 8 – Schermate PhotoScan con esempio di caricamento delle immagini da drone.	20
Figura 9 – Posizione delle camere associate alle immagini caricate in PhotoScan per il sito PO_2018_09, ottenute sulla base delle coordinate registrate dal GPS montato sul drone.	20
Figura 10 – Esempi di foto da eliminare prima di procedere con il processamento delle immagini in PhotoScan.	20
Figura 11 – Esempio di selezione e rimozione di immagini dal progetto di PhotoScan.	21
Figura 12 – Esempio di controllo del Sistema di Riferimento del progetto.	21
Figura 13 – Maschera di PhotoScan per l'allineamento delle foto caricate del drone.	22
Figura 14 – Esito dello STEP “Alignment” per il sito PO_2018_09: (a) posizioni e orientamenti delle camere; (b) zoom sulla nuvola rada di punti (‘Sparse Point Cloud’).	22
Figura 15 – Maschera di PhotoScan per l’inclusione dei punti di appoggio a terra e suggerimento da parte del software delle immagini contenenti i target e loro posizione.....	23
Figura 16 – Inclusione dei punti GPS e riposizionamento dei marcatori nel centro del target a terra sul sito PO_2018_09.	24
Figura 17 – Esempio di Tabella dei markers per PO_2018_09.....	24
Figura 18 – Maschera di PhotoScan per l’ottimizzazione delle camere.	25
Figura 19 – Procedura per la generazione della nuvola densa di punti.	26
Figura 20 – Nuvola densa di punti relativa al sito PO_2018_09.....	26
Figura 21 – Procedura per la generazione del DEM a partire dalla nuvola densa di punti.	27
Figura 22 – DEM relativo al sito PO_2018_09.	27
Figura 23– Procedura per la generazione dell’ortofoto e settaggio dei parametri.	28
Figura 24 – Ortofoto relativa al sito PO_2018_09.....	28
Figura 25 – Distanza (C2C absolute distances) tra i check points e la Dense Cloud generata da PhotoScan per il sito PO_2018_09.	29
Figura 26 – Plot dell’errore verticale vs. il numero di punti di validazione per ogni sito (per acronimi sito si veda Tabella 4).	30
Figura 27 – Esempio di classificazione di unità morfologiche SUM (Rinaldi et al., 2016b) a partire dall’ortofoto del sito PO_2018_09 prodotta nell’ambito delle attività dell’accordo. A, macro-unità come classificate per gli scopi di questa relazione. B, classificazione dei tipi di macro-unità secondo il SUM: C = canale principale; S = canale secondario; E = unità emerse; V = vegetazione in alveo; F = zona ripariale; H = zone dominate da attività antropiche; A = elementi artificiali. C, classificazione delle unità morfologiche secondo il SUM: canale principale; S = canale secondario; EC = barra laterale; EA = barra centrale; ED = canale emerso; VI = isola; VA = vegetazione acquatica; VJ = accumuli di materiale legnoso grossolano; F = zona ripariale; HA = zona agricola; AL = protezioni di sponda. D, distinzione tra barra laterale (EA) e canale emerso (ED).....	34
Figura 28. Esempio di risultato del software Basegrain applicato alle immagini a bassa quota nel sito del PO_2018_09.....	36

Figura 29 – Acquisizione PO_2018_09, da sinistra verso destra: Ortofoto APR a 10 cm classificata manualmente, stessa ortofoto con classificazione ricampionata a 10 m, ortofoto generata dal classificatore S2 a 10 m.	40
Figura 30 – In alto: matrice di confusione non normalizzata, a sinistra per S2_10m e a destra per S2_20m. In basso: matrice di confusione normalizzata, a sinistra per S2_10m e a destra per S2_20m. La scala di colori è graduata sul numero di pixel classificati.	42
Figura 31 – Importanza relativa delle bande nei due modelli: in alto per S2_10m e in basso per S2_20m.	44
Figura 32 – Grafico di dispersione dei valori di <i>Precision</i> e <i>Recall</i> per ogni sito ottenuti per il modello S2_10m. Il significato degli acronimi presenti nelle etichette dei punti è riportato in <i>Tabella 8</i>	46
Figura 33 – Confronto tra un’immagine non filtrata (sx) e una filtrata (dx).	48
Figura 34 – Influenza della varianza sulla forma della distribuzione gaussiana.	49
Figura 35 – Involuppo delle gaussiane G_i stimate per tutti gli intervalli del DR- <i>Dynamic Range</i>	50
Figura 36 – Immagine delle massime probabilità.	50
Figura 37 – Istogramma dell’immagine di massima probabilità.	51
Figura 38 – Pre-classificazione non filtrata (sx) e classificazione finale (filtrata)(dx). In blu i punti classificati positivamente in entrambe le polarizzazioni, in rosso solo per la VV e in verde per la VH.	51
Figura 39 – Schema operativo di STORM.	52
Figura 40 – Immagine di ampiezza con punti classificati: Blu (VV, VH), Verde (VV) e Rosso (VH).	55
Figura 41 - Esempio di maschera finale geocodificata.	55
Figura 42 – Contenuto della cartella di sessione al termine del processing di tre osservazioni.	56
Figura 43 – Esempio del file di configurazione.	56
Figura 44 – Esempio della sessione del toolbox STORM.	57
Figura 45 – Validazione ottenuta sul Po per l’acquisizione di settembre 2018 (PO_2018_09).	59
Figura 46 – Validazione fiume Paglia, località Orvieto (acquisizione OR_2018_07).	61
Figura 47 – <i>Scatterplot</i> di Accuratezza globale e <i>F1-score</i> . I colori dei <i>marker</i> fanno riferimento alla larghezza massima dell’area bagnata, mentre le aree blu, verde e rossa evidenziano tre diverse classi di <i>performance</i> della classificazione.	62
Figura 48 – Confronto tra due acquisizioni dello stesso sito (tratto a valle della fiumara Bonamico) in due periodi caratterizzati da condizioni climatiche diverse.	63

Premessa

La presente Relazione tecnica intermedia n. 2 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 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), 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 -2 e da eventuali aggiuntive campagne di misura, 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; <https://www.researchgate.net/project/Italian-Research-and-development-Initiative-for-Spaceborne-river-monitoring-IRIS>).

Parte integrante di questa relazione è lo stato di avanzamento delle attività rispetto al "Piano delle attività" e alla Relazione tecnica intermedia n.1 redatti, rispettivamente, a settembre 2017 e gennaio 2018.

Introduzione

L'obiettivo tecnico-scientifico specifico dell'accordo di collaborazione tra ISPRA e DEIB è quello di utilizzare il telerilevamento radar ad apertura sintetica (SAR-Synthetic Aperture Radar) e il telerilevamento ottico multispettrale a partire, rispettivamente, dai dati delle missioni ESA Sentinel-1 (S1) e Sentinel-2 (S2) dell'iniziativa Copernicus, 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), così come riportati nelle precedenti relazioni. 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 seconda fase di lavoro, da gennaio 2018 a gennaio 2019 (**Milestone M2**; [Figura 1](#)), e i risultati in essa conseguiti riguardanti il completamento delle campagne di raccolta dati su campo per tutti i siti selezionati (si rimanda alla Relazione tecnica intermedia n.1 per i dettagli sui siti di studio), il processamento delle immagini acquisite da drone, la creazione del dataset per la verità a terra (*ground truth*; Task 1) e l'acquisizione e le prime analisi delle immagini satellitari (Task 2, 3.1 e 4.1; [Figura 1](#)). In particolare, l'obiettivo della relazione è di fornire una guida operativa per lo svolgimento delle attività previste dall'accordo riguardo alla procedura di creazione della verità a terra

(Task 1) come base per la calibrazione e la validazione degli indicatori idromorfologici potenzialmente estraibili dai dati di S1 e S2 ([Tabella 1](#)).

Tali attività riguardano in sintesi il rilievo idromorfologico da aeromobili a pilotaggio remoto (APR), il processamento delle immagini acquisite da drone, la mappatura degli habitat (macro-unità SUM), e la misura della granulometria dalle suddette immagini. Inoltre, sono riportati i primi risultati ottenuti dagli algoritmi sviluppati per l'estrazione della maschera dell'area bagnata a partire dalle immagini SAR di S1 (Task 3.1) e per la classificazione delle macro-unità a partire dai dati satellitari multispettrali di S2 (Task 2.2 e 4.1).

I risultati riportati si riferiscono ai siti esaminati durante le campagne di misura svolte tra luglio 2017 e ottobre 2018 e forniscono un quadro dei possibili limiti e delle problematiche riscontrate che hanno permesso di definire le accuratèzze e gli errori raggiungibili nell'estrazione di indicatori idromorfologici a partire dalle immagini satellitari di S1 e S2.

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 (photosieving)	Sentinel-2
Indicatore 3	Larghezza alveo bagnato	Stima portata	Spectral Water Index da immagini ottiche S2; dati di portata	Sentinel-1
Indicatore 4	Larghezza alveo di piena (bankfull)	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 (DEM of Difference) + GPS	Sentinel-1 + 2

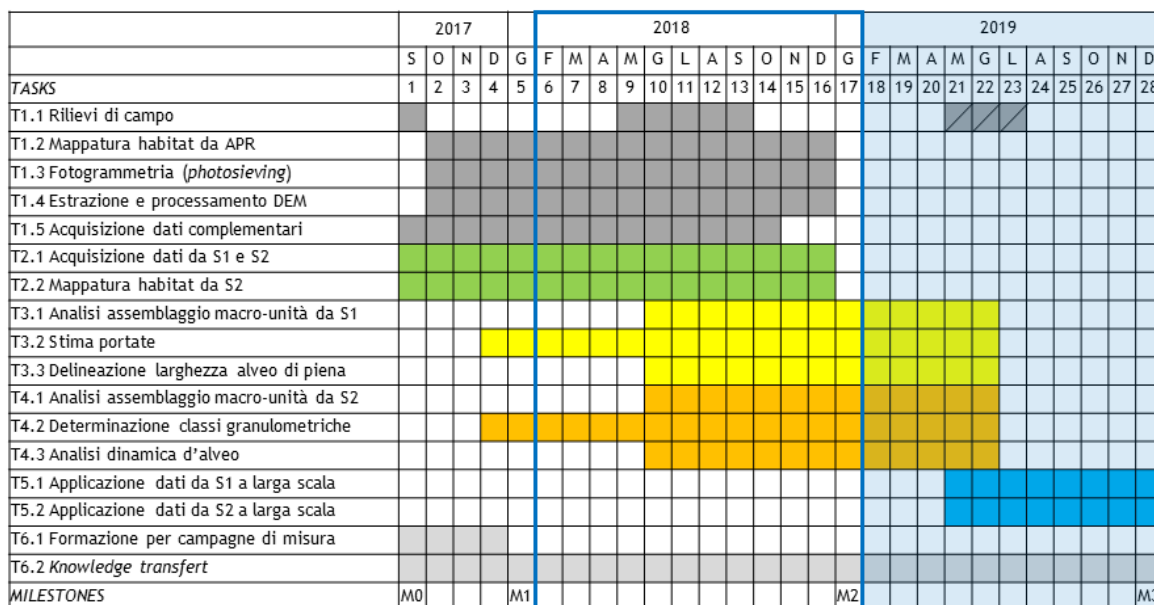


Figura 1 – Diagramma di Gantt delle attività previste. Legenda: APR, aeromobile a pilotaggio remoto; DEM, Digital Elevation Model; S1, Sentinel-1; S2, Sentinel-2. Milestone: M0, piano delle attività; M1, Relazione tecnica intermedia n. 1; M2, Relazione tecnica intermedia n. 2; M3, Relazione tecnica finale. I rilievi di campo T1.1 nel 2019 si intendono a eventuale integrazione ove necessario.

Stato di avanzamento delle attività

Nel diagramma di Gantt riportato in [Figura 1](#) sono elencate le attività oggetto dell'accordo, organizzate in 6 Task, e quattro Milestone di controllo per il raggiungimento degli obiettivi. La presente Relazione tecnica intermedia n. 2 si riferisce alla milestone M2. Nel riquadro blu di [Figura 1](#), sono evidenziate le attività previste per il periodo gennaio 2018–gennaio 2019 riguardanti, in particolare, il completamento delle attività per i Task 1 e 2 e l'avvio di tutte le attività dei Task 3 e 4 (si veda, per maggiori dettagli, il report iniziale di settembre 2017 riportante il piano delle attività).

In merito alle attività relative al Task 1, sono state portate a compimento tutte le campagne di misura previste negli 8 siti selezionati, descritti in dettaglio nella Relazione tecnica intermedia n.1, per un totale di tre campagne e 19 rilievi (Task 1.1; [Tabella 2](#) e [Figura 2](#)).

Rispetto alla pianificazione iniziale, per i siti nel Distretto Idrografico del fiume Po/ambito alpino, lungo i bacini dei fiumi Sesia e Po, sono state effettuate tre campagne di misura e non due, giacché le condizioni sfavorevoli in termini di portata in alveo riscontrate in aprile 2018 non avrebbero permesso un confronto più pertinente con quanto rilevato nel corso della prima campagna di autunno 2017. La terza campagna sui bacini del Po e del Sesia è stata, inoltre, utile al fine di meglio valutare alcune variazioni morfologiche osservate a seguito delle prime due campagne di misura. D'altra parte, le acquisizioni da drone effettuate sul Po durante la seconda campagna di misure di aprile 2018 hanno prodotto risultati non soddisfacenti e non verranno perciò riportati nella presente relazione (si veda la sezione [Analisi dei rischi](#)).

Sono state completate tutte le attività afferenti a T1.2, T1.3 e T1.4, relative alla creazione del dataset per la verità a terra, ossia i campi di *ground truth*, a partire dai dati raccolti nell'ambito di tutte le suddette campagne di misura (si veda la sezione [Creazione del dataset per la verità a terra \(Task 1\)](#)). I dataset così popolati dai dati delle campagne di misura e dai campi di *ground truth* faranno parte dei database osservativi del Work Package 8000 "Morfologia fluviale" (WP 8000) di "Habitat Mapping" presenti sulla piattaforma LaViSAM-Laboratorio Virtuale dei Servizi Ambientali.

Si segnala, inoltre, che al fine di avere un *testbed* comune a livello del progetto ASI-ISPRA "Habitat Mapping", è stato selezionato come ulteriore bacino di studio quello del Tagliamento, sul quale il gruppo di lavoro ISPRA-DEIB ha effettuato una campagna di misura a luglio 2018 su un tratto in località Camino al Tagliamento (tratto T1 nel Distretto Idrografico delle Alpi Orientali; [Figura 2](#)). Tale campagna, inizialmente non prevista dall'accordo, non è quindi oggetto della presente relazione e sarà descritta in una successiva relazione.

Tabella 2 – Sintesi delle campagne di misura per la creazione del dataset per la verità a terra.

Bacini campione	Codice tratto	Tratto esaminato	Località	Campagna 1	Campagna 2	Campagna 3
PO-SEZIA	P1	Sesia Arborio	Arborio (VC)	17/09/2017	18/04/2018	21/09/2018
	P2	Sesia Caresana	Caresana (VC)	19/07/2017	16/04/2018	22/09/2018
	P3	Po	Cascine nuove (PV)	16/09/2017	17/04/2018	20/09/2018
PAGLIA-TEVERE	L1	Acquapendente	Proceno (VT)	20/09/2017	17/07/2018	non prevista
	L2	Allerona	Allerona (TR)	18/09/2017	16/07/2018	non prevista
	L3	Orvieto	Orvieto (TR)	19/09/2017	17/07/2018	non prevista
BONAMICO	C1	Monte	San Luca (RC)	16/11/2017	24/10/2018	non prevista
	C2	Valle	San Nicola (RC)	16/11/2017	23/10/2018	non prevista

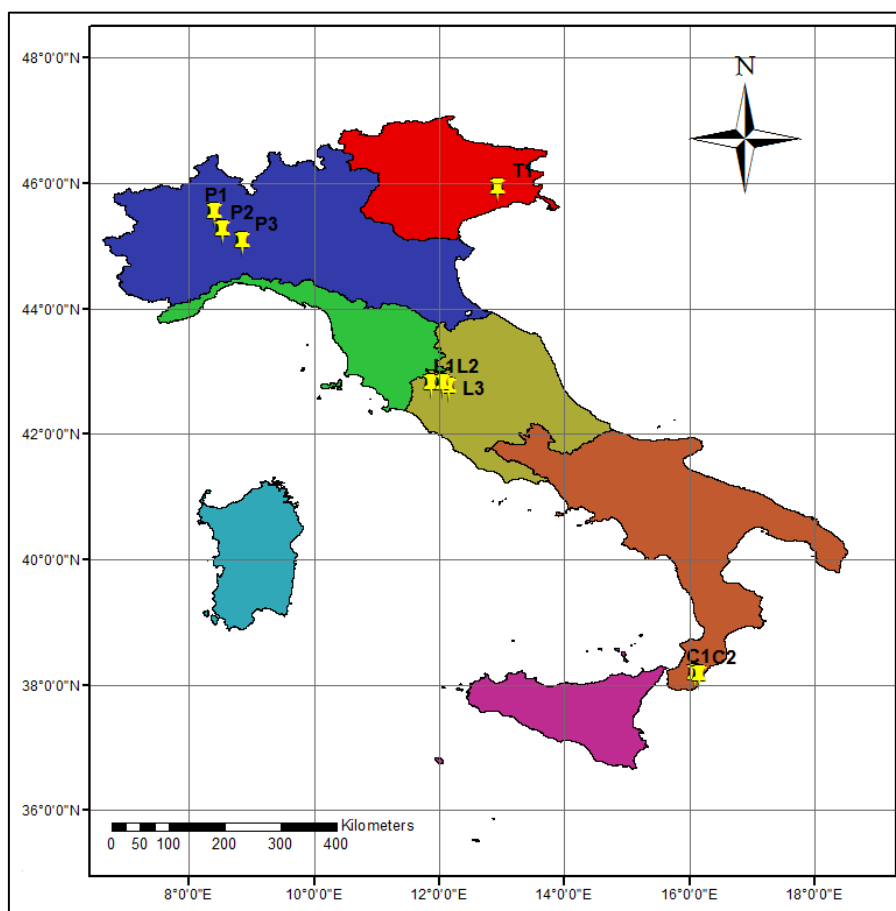


Figura 2 – Posizione dei tratti campione nei Distretti Idrografici italiani: P1–P3 nel Distretto Idrografico del fiume Po; T1 nel Distretto Idrografico delle Alpi Orientali; L1–L3 nel Distretto Idrografico dell’Appennino Centrale; C1–C2 nel Distretto Idrografico dell’Appennino Meridionale.

Nell’ambito delle attività relative al Task 2, sono state poi acquisite dall’HUB del programma Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) le immagini S1 e S2 relative all’arco temporale coperto dalle campagne di misura (luglio 2017–ottobre 2018; Task 2.1). Anche questo dataset farà parte dei dataset osservativi del LaViSam per il WP 8000. Nell’ambito di tale work package saranno, inoltre, testate le procedure per l’accesso ai dataset dei dati Sentinel attraverso le piattaforme [EU DIAS-Copernicus Data and Information Access Service](#) (e.g., [DIAS ONDA](#)).

Errore. L’origine riferimento non è stata trovata. In merito ai Task 3 e 4, sono state avviate le attività di analisi dell’assemblaggio delle macro-unità SUM da S1 (Task 3.1), avente come focus la creazione di una maschera per l’estrazione delle unità sommerse (si veda la sezione [STORM: SenTinel-1 \(One\) River Mapping toolbox](#)), e da S2 (Task 4.1), avente l’obiettivo di creare un classificatore per la mappatura delle macro-unità morfologiche da S2 valido per tutte le acquisizioni. Quest’ultimo da validare utilizzando come verità a terra la classificazione manuale prodotta da ortofoto drone nel Task 1.2 e successivamente ricampionata a 10 e 20 m per consistenza con la risoluzione spaziale del dato satellitare (Task 2.2). A tale scopo è stato sviluppato un classificatore per la mappatura degli habitat da S2 (si veda la sezione [Classificazione macro-unità da Sentinel-2](#)).

Errore. L’origine riferimento non è stata trovata. Nei giorni 12–14 del mese di Settembre 2018 il gruppo di lavoro del DEIB ha svolto a Roma un corso di formazione indirizzato ai colleghi del gruppo di lavoro di ISPRA, nell’ambito delle attività del Task 6 (Task 6.1 e 6.2). Infine, il 24 settembre 2018 è stato organizzato un workshop presso il Politecnico di Milano dal titolo “**AMBER meets IRIS**” (<https://www.eventi.polimi.it/events/amber-meets-iris/?lang=en>) durante il quale sono stati presentati

i risultati preliminari del progetto IRIS e l'iniziativa "Habitat mapping" nell'ambito della Convenzione ASI-ISPRA.

Rispetto agli indicatori idromorfologici riportati in [Tabella 1](#), le attività finora svolte hanno permesso:

1. Lo sviluppo di una procedura (classificatore) per la mappatura dell'assemblaggio delle unità morfologiche (**indicatore 1**) da S2 per le macro-unità SUM (nello specifico: "unità sommerse", "unità emerse", "vegetazione in alveo", "zona ripariale"; v. Rinaldi et al., 2016b), e una procedura (si veda punto 3) per l'estrazione della macro-unità "unità sommerse" a partire da S1;
2. La creazione della verità a terra per il successivo calcolo delle classi granulometriche da S2 (**indicatore 2**);
3. Il toolbox "STORM" per l'estrazione della macro-unità "unità sommerse" a partire da singole acquisizioni di S1, che integrato con le unità sommerse classificate da S2 costituiscono la base dati per il calcolo della larghezza dell'alveo bagnato (**indicatore 3**);
4. La creazione della verità a terra e la raccolta dati necessaria per il successivo calcolo della larghezza dell'alveo di piena (**indicatore 4**) e degli indicatori di processo (**indicatore 5**).

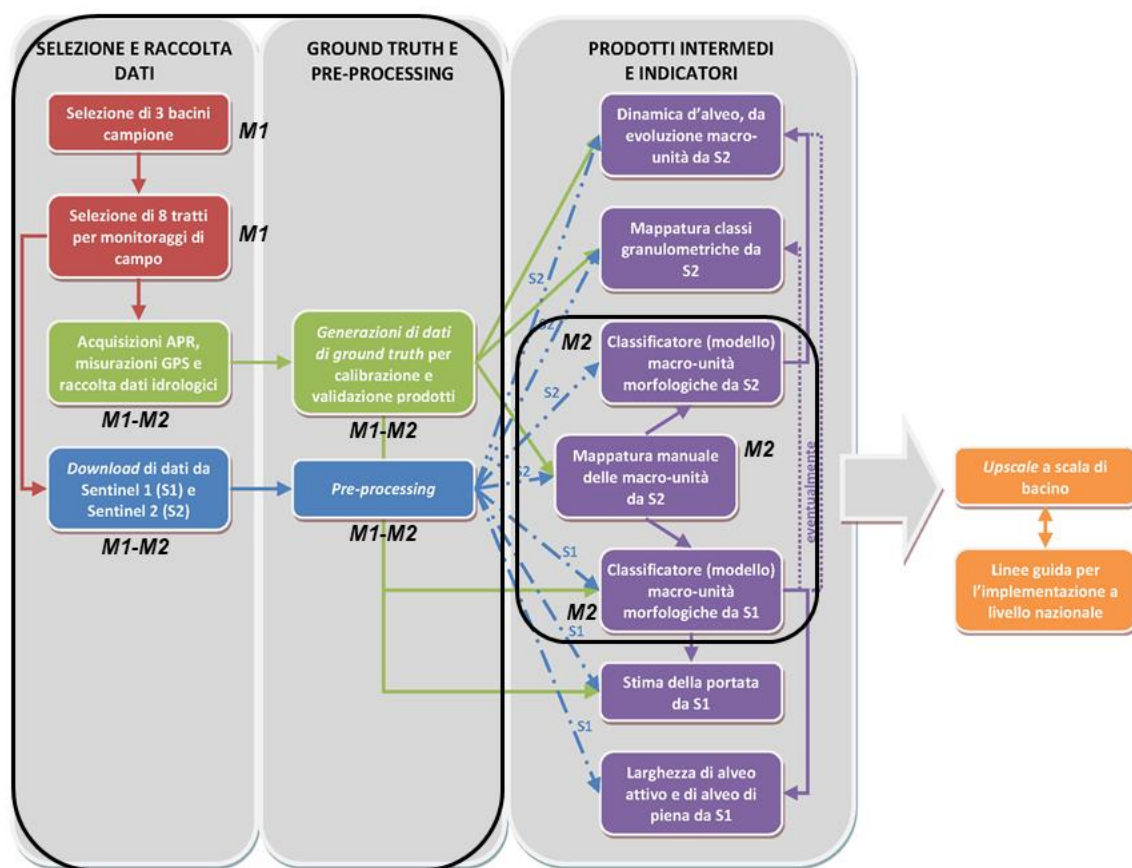


Figura 3 – Diagramma di flusso delle attività del presente Accordo così come definite nel Work Package “Morfologia fluviale” della Convenzione ASI-ISPRA “Habitat Mapping” (Fonte: Deliverable n. 16 “Requisiti di Sistema”). Nei riquadri neri sono comprese ed evidenziate le attività svolte finora e i primi prodotti intermedi estratti a seguito delle prime due fasi del lavoro, descritti nella presente Relazione tecnica intermedia n. 2. M1 e M2 corrispondono alle Milestone indicate in [Figura 1](#).

In [Figura 3](#) vengono riportate, tramite un diagramma di flusso, le attività previste per tutta la durata dell'accordo così come definite nel WP 8000 della Convenzione ASI-ISPRA “Habitat Mapping” (Fonte: Deliverable n. 16 “Requisiti di Sistema”), i relativi prodotti intermedi e gli indicatori finali. Le attività svolte

e descritte nella presente Relazione tecnica intermedia n. 2 sono quelle contenute nei riquadri neri, ossia quelle corrispondenti al conseguimento della Milestone M2 come riportato in [Figura 1](#). Con M1 sono inoltre indicate le attività afferenti alla Relazione tecnica intermedia n. 1 corrispondenti al conseguimento della Milestone M1 (v. Relazione tecnica intermedia N.1; [Figura 1](#)).

Quadro metodologico complessivo

Come specificato in [Tabella 1](#) in merito all'**indicatore 1**, oggetto del presente accordo è la mappatura delle **macro-unità SUM** (Rinaldi et al., 2016b), ossia di quelle unità spaziali costituite da un insieme di unità dello stesso tipo, definite da caratteristiche tessiturali comuni (ad es., porzioni acquatiche, sedimenti, vegetazione). Ai fini dell'estrazione degli indicatori idromorfologici, le attività si focalizzano, in particolare, su uno specifico dominio spaziale, il **corridoio fluviale**, ossia quella zona relativamente naturale, generalmente occupata da vegetazione spontanea, che include il cosiddetto **alveo attivo**, cioè la parte dell'alveo di fiume 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 parte della pianura alluvionale (incluse la piana inondabile, i terrazzi recenti, ecc.). Le macro-unità SUM che occupano il corridoio fluviale e quindi interessate dalle attività illustrate nella presente relazione sono: "unità sommerse" soprattutto dominate dalla presenza di acqua (nel testo anche chiamate aree bagnate); "unità emerse", dominate dalla presenza di sedimento; unità "vegetazione in alveo" e "zona ripariale", dominate dalla presenza di vegetazione spontanea (Rinaldi et al., 2016b). Tali macro-unità possono essere facilmente individuate da remoto e in particolare da immagini satellitari aventi risoluzione spaziale intorno ai 10÷20m, quali sono quelle da S1 e S2.

Gli 8 siti oggetto del presente accordo sono stati selezionati, come dettagliato nelle precedenti relazioni, in modo da rappresentare, a grandi linee, la diversità di ambienti sul territorio italiano (Alpi, Appennino Centrale, Appennino Meridionale). La selezione dei siti è stata guidata dalla rispondenza a una serie di condizioni riguardanti in primo luogo le dimensioni dell'alveo attivo e di magra in relazione alla risoluzione spaziale delle immagini satellitari. Per questa ragione sono stati inclusi soprattutto tratti il cui l'alveo di magra fosse > 20÷30 m (esempio il Po e il Sesia), ma anche siti dove l'alveo attivo fosse >30 m, anche in assenza di alveo di magra al momento dell'acquisizione: si veda ad esempio il sito del Bonamico a monte nel novembre del 2017. Infatti, mappare la dinamica temporale delle macro-unità da S2 (Task 2.2 e Task 4.1) è potenzialmente interessante anche in questi siti dove l'alveo di magra è assente gran parte dell'anno. Inoltre, era importante selezionare fiumi caratterizzati da un'importante dinamica fluviale, per cui nei tratti scelti doveva essere possibile osservare, durante il periodo di studio, dinamiche morfologiche significative all'interno dell'alveo attivo (il quale, insieme alle isole, viene chiamato "alveo" o anche *bankfull channel* in Rinaldi et al., 2016a). Per questa ragione sono stati inseriti tratti di fiumi a canali intrecciati o pluricorsali come il Bonamico e il Sesia Arborio (siti C1, C2 e P1; v. [Figura 2](#) e [Tabella 2](#)). Un altro criterio importante nella scelta dei siti era la rappresentatività in termini di *habitat mapping*, per cui i tratti selezionati dovevano includere una vasta gamma di unità morfologiche (Rinaldi et al., 2016b; Belletti et al., 2017): infatti, sono stati inseriti tratti fluviali delle Alpi e degli Appennini centrali e meridionali. Infine, i siti sono stati scelti anche per la presenza in prossimità del tratto di stazioni di misura idrometriche utili al fine della raccolta di dati di portata da utilizzare nelle attività di calibrazione e validazione dell'**indicatore 3**.

Nelle sezioni seguenti viene presentata in dettaglio la metodologia generale standardizzata e operativa per l'acquisizione, il processamento e l'analisi dei dati di *ground truth* (*verità a terra*). Tale metodologia include una strategia per l'acquisizione dati con APR (drone), ossia le modalità di programmazione dei piani di volo per gli scopi specifici del presente accordo definiti e raffinati sulla base dell'esperienza operativa

maturata durante le campagne di misura. Inoltre, saranno specificate le modalità di acquisizione e utilizzo dei punti GPS (punti target e di controllo) per georeferenziazione centimetrica e la validazione dei dati acquisiti da drone e le fasi di processamento delle immagini da drone ai fini della costruzione del modello digitale del terreno (DEM–*Digital Elevation Model*) e dell’ortomosaico. Infine, sono specificate le accuratezze e la precisione dei risultati necessarie per il conseguimento degli obiettivi dell’accordo. Al fine del raggiungimento degli obiettivi del presente accordo si ritiene che siano necessarie almeno due acquisizioni distanziate di un anno circa in modo da includere eventuali modifiche morfologiche occorse a seguito di eventi di piena. La [Figura 4](#) mostra uno schema riassuntivo dei vari step della metodologia utilizzata per la creazione del dataset per la verità a terra, descritta in dettaglio nella sezione [Creazione del dataset per la verità a terra \(Task 1\)](#).

Gli strumenti previsti per l’applicazione della metodologia di acquisizione proposta sono presentati sinteticamente in questa sezione, mentre una descrizione dettagliata dei singoli strumenti e del loro impiego per lo svolgimento dei vari task e per il calcolo degli indicatori è riportata nelle sezioni successive laddove sono utilizzati.

La metodologia prevede che le osservazioni di campo vengano svolte, oltre che con l’impiego di tecniche tradizionali di rilevamento (ad es., GPS–*Global Positioning System*), anche tramite l’utilizzo di strumenti finanziariamente sostenibili, quali ad esempio APR a basso costo, al fine di validare per ogni sito, grazie a immagini ad altissima risoluzione, le osservazioni da satellite. In tal modo, è possibile garantire una copertura spaziale significativa con uno sforzo di campionamento ridotto rispetto alle tecniche tradizionali (anche in termini economici), con lo scopo di raggiungere un’automazione sempre maggiore per l’estrazione degli indicatori idromorfologici.

Nello specifico, per le attività tradizionali di rilevamento si è utilizzato un GPS-RTK (*Real-time Kinematic*) della Trimble dotato di ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*) di tipo R10. Lo strumento GPS, per quanto molto costoso (dell’ordine dei 20.000,00 Euro), è a oggi fondamentale per permettere una georeferenziazione dell’ordine dei cm di accuratezza delle elaborazioni derivate dalle misure in campo da drone. A esso, nei lavori di campo, è stato affiancato come modello di drone il Phantom 4 Pro della DJI, provvisto di camera RGB, il cui costo è inferiore ai duemila Euro (inclusi batterie, tablet e accessori funzionali alle attività in campo). Le immagini da drone, acquisite durante i rilievi di campo, sono state processate utilizzando il software Agisoft PhotoScan (<http://www.agisoft.com/>) con cui sono state prodotte, per ciascun sito, i DEM e le ortofoto utili alla creazione dei modelli di classificazione per l’estrazione degli indicatori idromorfologici oggetto dell’accordo.

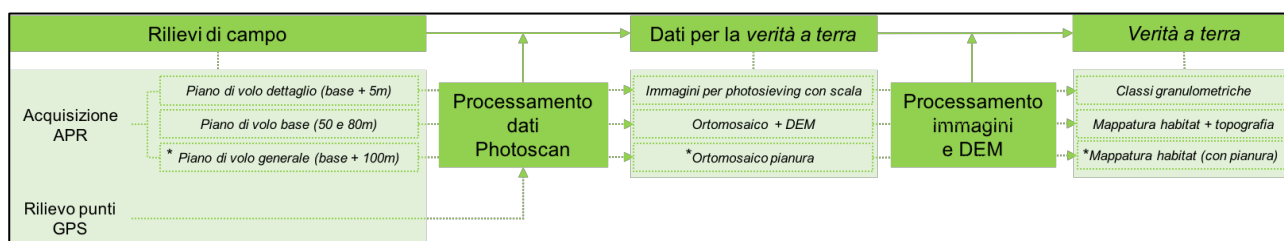


Figura 4 – Diagramma di flusso riassuntivo dei vari step della metodologia per la generazione di dati di verità a terra per la calibrazione e validazione dei prodotti (Task 1). Gli step intermedi indicati con il simbolo *, pur non essendo inizialmente previsti dal presente accordo (v. Piano delle attività), sono stati comunque prodotti per testare una più ampia applicazione della metodologia alle aree di pianura circostanti il corridoio fluviale.

L’implementazione della metodologia ha previsto l’impiego, oltre del già citato Agisoft PhotoScan, dei seguenti software e linguaggi di programmazione: CloudCompare, QGIS/ArcGIS, Grass, Python, Basegrain, Litchi, e Matlab. Lo scopo del loro utilizzo è specificato nelle sezioni che seguono per ogni tecnica di analisi implementata.

L'[APPENDICE I](#) alla presente relazione riporta una scheda per ognuna delle 18 (poiché Po in aprile 2018 non ha prodotto risultati soddisfacenti) campagne di misura effettuate dove vengono riportati per ogni acquisizione i prodotti principali generati in termini di verità a terra e classificazioni generati da S2 e S1.

Parte integrante della presente relazione è un pacchetto di prodotti digitali che include: i dati S2 e S1 scaricati dall'HUB di Copernicus, le foto APR acquisite per ogni sito, i dati GPS raccolti per i target e i punti di controllo, i progetti PhotoScan realizzati sulla base dei dati delle campagne di misura e tutti gli script Python e toolbox Matlab descritti nella presente relazione. La struttura a cartelle con cui è organizzato tale pacchetto è descritta nelle sezioni che seguono per ogni singola procedura sperimentata all'interno del quadro metodologico complessivo, partendo da una cartella madre del progetto denominata **IRIS_repository**.

Creazione del dataset per la verità a terra (Task 1)

I risultati delle Task 1.1 e 1.4 descritte di seguito sono state organizzate, nel pacchetto digitale, per aree di studio (Po-Sesia; Paglia; Calabria) e per campagne di rilevamento. È stata quindi creata una cartella per ciascuna area di studio (es. Po-Sesia) e quindi una sottocartella per ciascuna campagna di misure (es. Settembre 2017, Settembre 2018), secondo la directory *IRIS_Repository\areastudio\acquisizione* (es. *IRIS_Repository\Po-Sesia\Settembre_2018*), all'interno della quale si trovano quindi tutti i risultati dei rilievi di campo (immagini acquisite, progetti PhotoScan, ortofoto generate, ecc.).

Rilievi di campo (T1.1)

Acquisizione immagini da APR: Piani di volo

Come precedentemente riportato, le acquisizioni sono state realizzate con un drone Phantom 4 Pro della DJI, dotato di camera ottica RGB montata su un supporto (*gimbal*) che ne consente la stabilizzazione, migliorando la qualità delle immagini di volo (<https://www.dji.com/it/phantom-4-pro/info#specs>). Questo APR, nonostante il costo ridotto, fornisce prestazioni sufficienti ai fini del progetto: creare i campi di verità a terra per calibrare gli indicatori di caratterizzazione idromorfologica dei corsi d'acqua basati su dati satellitari Sentinel. La precisione delle acquisizioni fatte verrà discussa in dettaglio nelle sezioni successive nell'ambito dell'analisi dei prodotti generati, quali ortofoto e modelli digitali di elevazione (DEM).

I limiti di legge in Italia per il pilotaggio APR in “zone non critiche” (quelle in cui ricadono i tratti fluviali oggetto di monitoraggio) impongono di poter pilotare un drone non oltre i 500 m dal pilota e a un'altezza dal suolo inferiore ai 150 m. Date queste restrizioni, l'intento delle acquisizioni è quello di creare, per ogni punto di accesso al fiume selezionato, ortofoto e DTM con precisioni centimetriche su tratti fluviali di estensione lungo l'asta fluviale dell'ordine del chilometro o di poco inferiore.

Le immagini delle aree oggetto di studio sono state acquisite ogni 2" mediante piani di volo realizzati utilizzando il software Litchi. In particolare, sono stati utilizzati tre tipi di piani di volo ciascuno con specifiche finalità, di seguito illustrate:

- **Piano di volo base:** l'area di cui si vuole realizzare ortofoto e DTM a precisione centimetrica è stata coperta con strisce di volo a 50 m di altezza dal suolo, con camera orientata perpendicolarmente al terreno e impostando una velocità di crociera di circa 21 km/h. A tale altezza, date le caratteristiche della camera RGB dell'APR Phantom 4 Pro per cui un pixel misura 1.67 cm, impostando una velocità di crociera di circa 21 km/h e una velocità di scatto di 2" a foto, si garantisce una sovrapposizione lungo l'asse di volo di circa l'80% delle aree fotografate. Per garantire un'adeguata sovrapposizione anche parallelamente alle strisce di volo, quest'ultime sono distanziate lateralmente dai 30 m ai 50 m, al massimo, nei piani di volo. Si è, inoltre, constatato da letteratura (Carbonneau and Dietrich, 2017), che integrare queste immagini con acquisizioni ad altezze maggiori e inclinazioni della camera con angoli variabili (ad es., comprese tra -45° e -60°) aiuta il progetto fotogrammetrico aumentandone la precisione. Per questa ragione, le aree di volo coperte da acquisizioni a 50 m sono state poi integrate con voli a 80 m, con il gimbal della camera APR inclinato secondo un angolo variabile tra -45° e i -60°, impostando una velocità di crociera di 25 km/h e scattando sempre foto ogni 2".
- **Piano di volo generale (per generare ortofoto della pianura alluvionale):** in alcuni casi può essere utile cercare di generare un'ortofoto più ampia del tratto di studio, al fine di caratterizzare l'uso del suolo e la topografia circostante il tratto fluviale. A questo fine sono state effettuati dei piani di volo specifici. Tali piani prevedono di porre il punto base grosso modo al centro del tratto di acquisizione del **piano di volo base** e di volare a un'altezza di circa 100 m dal suolo compiendo

una traiettoria circolare con un diametro tale da ricomprendere al suo interno l'area acquisita nell'ambito del **piano di volo base**. Una volta selezionata una velocità di crociera tale da completare ogni traiettoria circolare in 3 minuti circa e una frequenza di scatto ogni 2", sono compiuti quattro giri, due con la camera rivolta verso l'interno della traiettoria (ossia verso il punto base) e due con la camera rivolta verso l'esterno, variando in ogni giro le inclinazioni del gimbal (a -65° e a -45°). Queste acquisizioni permettono di creare un'ortofoto molto ampia della zona di studio (si veda, ad es., l'ortofoto dell'acquisizione sul tratto del Po di settembre 2018 riportata in [Figura 24](#)). Ovviamente, al di fuori dell'area acquisita con i piani di voli fatti a 50 m la precisione del DTM e dell'ortofoto diminuisce poiché per ogni punto il numero di immagini a disposizione è molto inferiore. Tuttavia, non rientra tra le finalità dell'iniziativa IRIS valutare la precisione del progetto fotogrammetrico in queste aree "esterne". Infatti, le precisioni riportate e discusse nelle successive sezioni riguardano esclusivamente le aree coperte principalmente con il **piano di volo base**. Nel pacchetto di prodotti digitale, si riportano comunque le ortofoto realizzate con la metodologia descritta poiché ritenuta un'informazione utile per vari scopi alla caratterizzazione delle zone limitrofe al corso d'acqua: dalla classificazione dell'uso del suolo alla caratterizzazione geomorfologica di tali aree e al loro monitoraggio nel tempo.

- **Piano di volo di dettaglio (per la caratterizzazione granulometrica dei sedimenti fluviali):** se interessati a caratterizzare la granulometria dei sedimenti superficiali utilizzando software specifici, come ad esempio BASEGRAIN (si veda sezione dedicata [Calcolo granulometria \(T1.3\)](#)), si può compiere un piano di volo *ad-hoc* al fine di integrare queste immagini nel progetto fotogrammetrico e ottenere la scala della singola immagine senza bisogno di porre a terra un righello che funga da riferimento per ottenere la scala degli oggetti rappresentati in foto (Carbonneau et al., 2018). In questo modo, oltre a velocizzare notevolmente le acquisizioni di immagini a bassa quota per la caratterizzazione granulometrica, è possibile estendere la caratterizzazione granulometrica a barre accessibili solo da drone (ad es., in mezzo all'alveo fluviale), permettendo l'acquisizione di un numero molto maggiore di immagini su cui poi calcolare la distribuzione granulometrica. I voli di questo tipo sono stati fatti a un'altezza di 5 m lungo le barre di sedimento che si volevano caratterizzare impostando il gimbal della camera perpendicolare al terreno (-90°). A 5 m, si generano immagini a una risoluzione di 1.7 mm per pixel. È quindi possibile caratterizzare sedimenti maggiori di 2 mm (limite superiore per la sabbia). Questo limite è utile per caratterizzare la frazione ghiaiosa dei fiumi oggetto dello studio. Al fine di poter integrare nel progetto fotogrammetrico le immagini a 5 m è però necessario acquisire nelle stesse aree anche immagini a 20 m. Quest'ultime aiutano il software di fotogrammetria (PhotoScan nel presente progetto, si veda sezioni successive) a riconoscere i medesimi punti rilevati a 50 m e a 5 m. Senza un piano di volo intermedio a 20 m è molto probabile che la maggioranza delle foto a 5 m non sia inclusa dal software nel progetto fotogrammetrico del **piano di volo base**. Occorre rilevare che l'aggiunta del volo a 20 m non garantisce che tutte le immagini a 5 m siano incluse nel progetto fotogrammetrico, poiché il risultato dipende dalla condizione dell'illuminazione e della tessitura delle immagini.

In tutti i rilievi effettuati, il **piano di volo base** è sempre stato effettuato mentre il **piano di volo generale** e il **piano di volo di dettaglio** sono stati effettuati a seconda delle condizioni del sito e delle esigenze del progetto. Il progetto fotogrammetrico realizzato in PhotoScan per ogni sito è unico: in esso sono caricate e integrate le immagini acquisite durante tutti i piani di volo realizzati (i progetti di PhotoScan sono disponibili nel pacchetto di prodotti digitali, sotto la directory `IRIS_Repository\areastudio\acquisizione\PhotoScan_Projects`). Le acquisizioni del **piano di volo base** coprono aree di poco inferiori al km², mentre le aree acquisite includendo anche il **piano di volo generale**

raggiungono estensioni dell'ordine dei 2–3 km². Le successive sezioni descrivono i vari passaggi eseguiti per generare il progetto fotogrammetrico in PhotoScan e per il calcolo delle precisioni ottenute.

Rilievo punti GPS

Prima di iniziare ciascuna campagna di rilevamento dei punti a terra, è necessario effettuare le operazioni previste dal software del controller del GPS-RTK della Trimble per calibrare il sensore GNSS (ossia calibrazione della pendenza e calibrazione e allineamento del magnetometro). Il sistema di coordinate scelto per il rilievo dei punti è l'UTM, Datum WGS 84, Zona 32 Nord. Il rilevamento GNSS è, come anticipato, di tipo cinematico in tempo reale.

A valle di ciò, lo strumento della Trimble è stato utilizzato per la determinazione delle coordinate di punti cosiddetti “target” che sono punti a terra di riferimento per la georeferenziazione centimetrica delle immagini acquisite mediante APR. Un esempio di target a terra è riportato in [Figura 5](#): come si nota dalla figura, i target devono essere posizionati sulle barre di sedimento esposte, avendo cura di garantirne la visibilità dall'alto, per facilitarne il riconoscimento nella fase di processamento con PhotoScan delle immagini acquisite da drone (fino a quota di circa 50 m). Proprio per garantirne la visibilità i target sono stati realizzati su fogli del formato A0 (297 × 420 mm).



Figura 5 – Esempio di posizionamento di un punto target da rilevare con GPS di precisione.

Inoltre, poiché è su di essi che si basa la georeferenziazione centimetrica dell'ortofoto, è importante che siano ben distribuiti sull'area di interesse e che siano in numero totale non inferiore a 10–20 a seconda dell'estensione e dell'accessibilità del sito. È buona pratica, dunque, sul campo, fare riferimento al piano di volo del drone per capire fin dove estendere il posizionamento dei target, assicurandosi di coprire tutta l'area esaminata, in particolare posizionando i target in aree caratterizzate da altitudine diverse, ove presenti. Una volta individuata l'area, si procede distribuendo i target lungo 2 o 3 linee parallele tra loro e

perpendicolari alla direzione di flusso del corso d'acqua ([Figura 6](#)), mantenendo un distanziamento medio tra le linee di circa 100 m (variabile a seconda dell'area campionata).

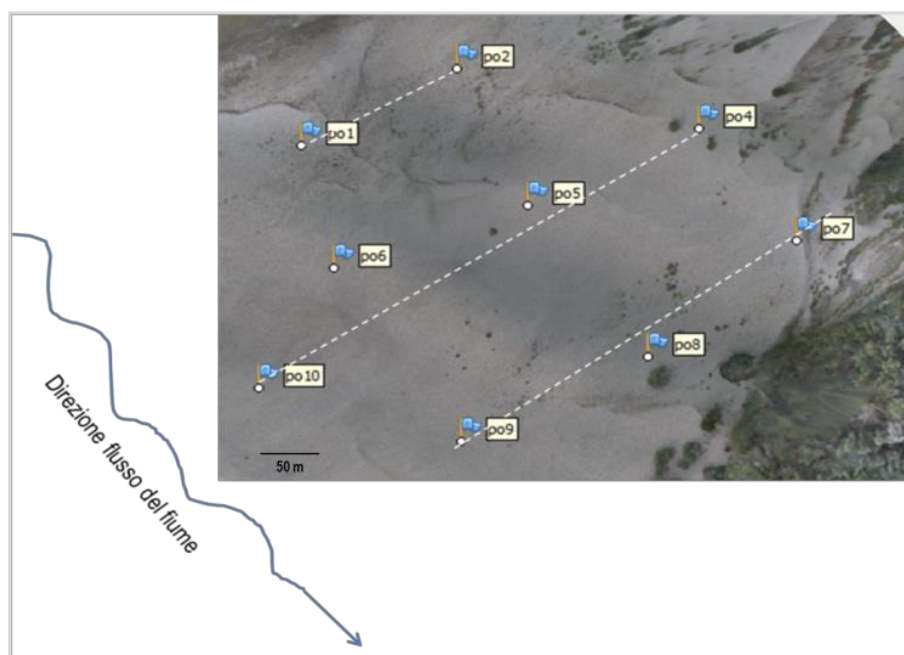


Figura 6 – Disposizione dei punti GPS secondo linee parallele tra loro e perpendicolari alla direzione della corrente nel sito sul Po nel settembre 2018 (acronimo PO_2018_09).

La misura dei punti target si effettua con il metodo “*Punto di rilevamento*” impostando un tempo di occupazione di 2” e un numero di misurazioni uguale a 2. La misura del punto, una volta effettuata la messa in bolla, viene pertanto conclusa in 4”. Oltre al rilevamento dei target, si procede con l’acquisizione di altri punti sparsi sull’area di interesse in numero molto maggiore rispetto ai punti target e che, rispetto a essi, hanno una diversa finalità dovendo essere utilizzati nella fase di validazione della georeferenziazione del prodotto generato da PhotoScan (i cosiddetti “punti di controllo”). Per questi punti, il metodo di rilevamento è quello a “*Punto rapido*” che, pur con precisioni minori (maggiore tolleranza sull’inclinazione), consente tempi di campionamento molto più brevi, e dunque ben si adatta al rilievo di un numero considerevole di punti. A tutela della qualità del rilievo, il software in dotazione allo strumento Trimble è impostato per fornire, durante il rilievo di un punto, avvisi riguardanti la copertura satellitare, l’eventuale eccesso di inclinazione o l’eccessivo movimento dello strumento e la scarsa precisione del rilievo. Poiché questi punti sono usati nella fase di validazione, è opportuno rilevarli in punti diversi e lontani dai punti target (che sono i punti usati per la georeferenziazione in PhotoScan). È opportuno, inoltre, nominare e salvare i punti in maniera diversa se vengono misurati dentro al canale bagnato o in corrispondenza di vegetazione in modo che siano distinguibili al momento della validazione e non inclusi per questo scopo. Infatti, i punti utili alla validazione sono solo quelli presi sulla barra e sul sedimento esposto, poiché il modello di elevazione da validare è un DSM–*Digital Surface Model* e fornisce il valore di elevazione della chioma della vegetazione, non del suolo sottostante. Per ciascun sito è stato creato un Rapporto di Rilevamento (“*Survey Report*”) che contiene tutte le informazioni rilevanti di una data sessione di campionamento o “lavoro” e la descrizione delle condizioni in cui è stato effettuato il rilevamento di ciascun punto. In questo modo, è stato possibile valutare la qualità delle posizioni misurate. Nella [Tabella 3](#) è riportato un estratto di tale report prodotto per il tratto *Bonamico Valle* (sito C2) acquisito nel novembre 2017 (denominato BV_2017_11), riferito al target **p1**, la cui posizione è stata determinata con il metodo

“Punto rilevamento”, utilizzando una costellazione composta da 16 satelliti, con precisioni orizzontale e verticale rispettivamente uguali a 0.012 m e 0.020 m e distanza di pendenza di 0.010 m.

Tabella 3 – Estratto del Survey Report per il punto target p1 nel sito C2. Legenda: PDOP, *Position Dilution of Precision*; GDOP, *Geometric Dilution of Precision*; HDOP, *Horizontal Dilution of Precision*; VDOP, *Vertical Dilution of Precision*.

Nome lavoro	BV_2017_11								
Punto	p1	ΔX	1632.128	ΔY	-1522.175	ΔZ	-1467.376	Codice	
		Metodo	Rete RTK	Tipo	Punto rilevamento	Ricerca classe	Normale		
Altezza antenna	2	Tipo	Senza correzione	Distanza pendenza	0.01	Prec or	0.012	Prec. v.	0.02
QC 1		PDOP	1.6	GDOP	2	HDOP	0.8	VDOP	1.4
		Età dati base	1	Satelliti	16	Posizioni utilizzate	3		
QC 2		VCV xx (m ²)	0.000383	VCV xy (m ²)	0.000082	VCV xz (m ²)	0.000101		
				VCV yy (m ²)	0.000053	VCV yz (m ²)	0.000029		
						VCV zz (m ²)	0.000095		

L'accuratezza del rilievo è sensibile al numero di satelliti connessi al GPS e alla loro distanza reciproca. Il numero minimo di satelliti è 4, ma l'inizializzazione della RTK ne richiede almeno 5. Riguardo alla bontà della configurazione della costellazione di satelliti utilizzati durante la misurazione si utilizzano opportuni indicatori. Il DOP–*Dilution of Precision* è una misura della qualità delle posizioni GPS, basata sulla configurazione geometrica dei satelliti utilizzati per calcolare le posizioni rispetto al ricevitore. Una migliore distribuzione dei satelliti nel cielo, cui è associata una maggiore accuratezza della posizione, comporta un maggiore distanziamento tra essi sia sul piano orizzontale che su quello verticale e si traduce in un DOP più basso. L'accuratezza di una posizione 3D viene espressa attraverso il PDOP–*Position Dilution of Precision*. Lo HDOP–*Horizontal Dilution of Precision* e il VDOP–*Vertical Dilution of Precision* sono le componenti rispettivamente orizzontale e verticale del PDOP. Il GDOP–*Geometric Dilution of Precision* consente di fornire una valutazione della qualità della configurazione relativamente a una determinata posizione e a un determinato tempo. Occorre mantenere i valori DOP al di sotto di 6. Valori buoni sono tra 4 e 6; valori eccellenti sono compresi fra 1 e 2, mentre valori al di sotto di 1 sono considerati ideali.

Processamento immagini: Estrazione ortofoto e DEM su PhotoScan (T1.4)

Le immagini acquisite da drone vengono processate utilizzando il software Agisoft PhotoScan, un software che realizza il processamento fotogrammetrico di immagini digitali e genera modelli spaziali in 3D. Obiettivo del processamento delle immagini acquisite è di ottenere i campi di *ground truth* con cui validare i prodotti derivati dai dati satellitari.

Nello specifico, per ogni sito il processamento delle immagini da drone produce come output la topografia (DEM) e l'ortofoto. Per ottenere questi output, il software ricostruisce il modello spaziale 3D (la scena) basandosi sulla tecnologia cosiddetta “*Structure from Motion (SfM) photogrammetry technology*” (Westoby MJ et al., 2012; Fonstad MA et al., 2013) risolvendo simultaneamente e automaticamente la posizione reciproca delle camere all'atto della presa e la geometria della scena. In [Figura 7](#) sono illustrati schematicamente gli step metodologici previsti in PhotoScan al fine di ottenere i suddetti output. Nei paragrafi successivi, ogni step è spiegato nel dettaglio e sono indicate le opzioni di configurazione e i parametri da usare per garantire le accuratezze richieste per la validità dei campi di *ground truth*.

A supporto della descrizione dei vari step sono riportate le immagini relative al progetto realizzato per il sito sul Po relativamente all'acquisizione di settembre 2018 (denominato PO_2018_09). I risultati di PhotoScan per ogni sito, invece, sono riportati nella sezione [APPENDICE I](#).

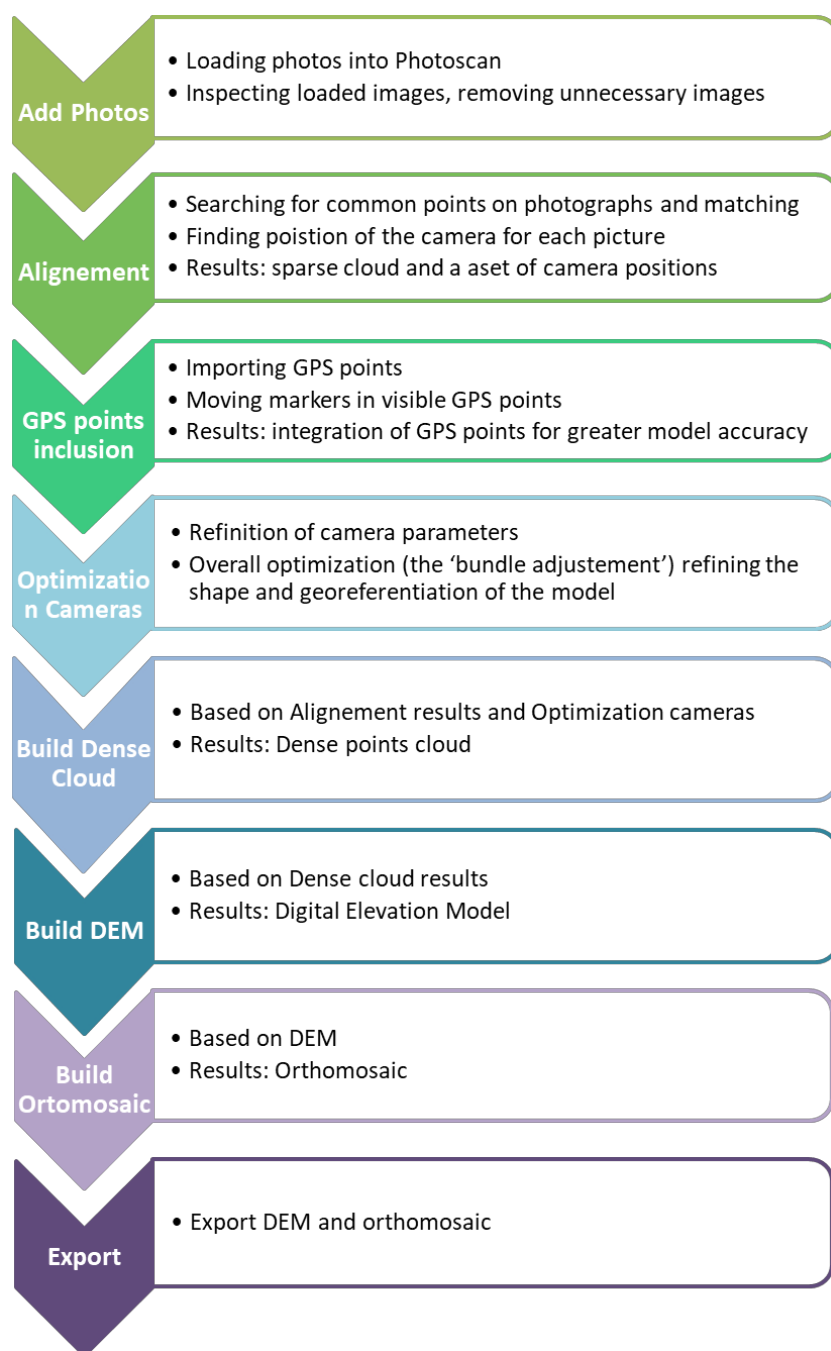


Figura 7 – Schema a blocchi di sintesi delle operazioni di processamento delle immagini da drone su PhotoScan.

STEP 1: Add photos

Il primo step prevede di caricare in PhotoScan tutte le foto (“Add photos”; [Figura 8](#)) acquisite da drone durante la campagna di rilievo condotta su un determinato sito. Il numero di fotogrammi disponibili dipende dal piano di volo effettuato e questo a sua volta è definito in relazione alla complessità morfologica e all'estensione dell'area rilevata in ciascun sito e alla necessità di creare delle sovrapposizioni tra le immagini acquisite. Una volta caricate le foto, la posizione delle camere può essere visualizzata in 3-D utilizzando il tasto “Show Cameras”, nella barra degli strumenti ([Figura 9](#)). PhotoScan visualizza la posizione delle camere estraendo le coordinate dai metadati EXIF associati alle foto. Tali coordinate sono

state originariamente salvate (in maniera automatica) dal GPS montato sul drone e hanno una precisione dell'ordine della decina di metri.

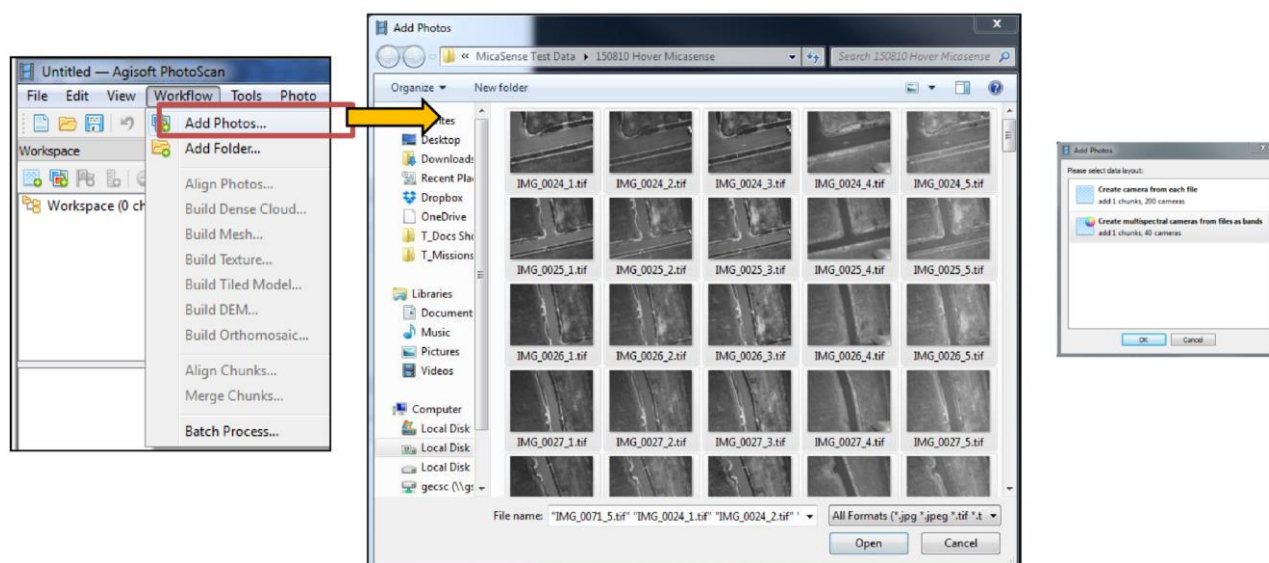


Figura 8 – Schermate PhotoScan con esempio di caricamento delle immagini da drone.

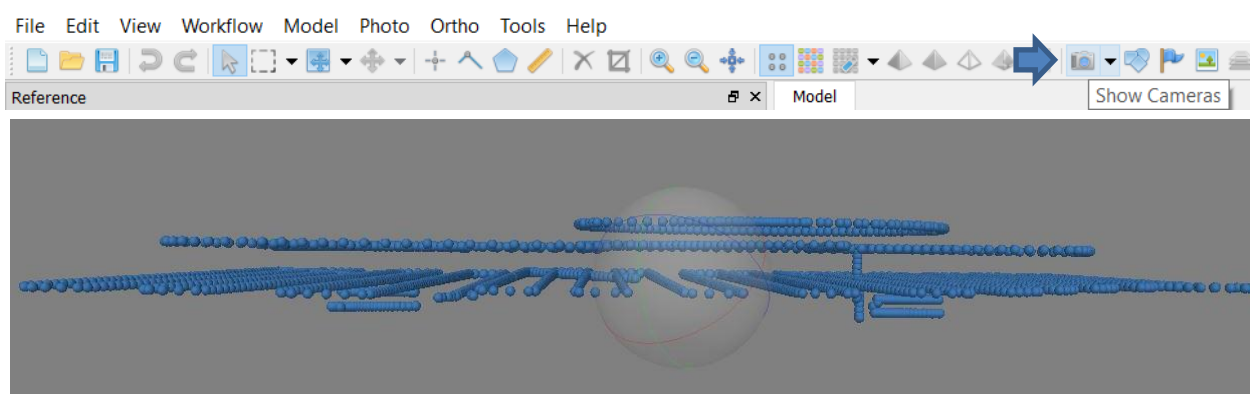


Figura 9 – Posizione delle camere associate alle immagini caricate in PhotoScan per il sito PO_2018_09, ottenute sulla base delle coordinate registrate dal GPS montato sul drone.

La visualizzazione in 3D delle camere, favorisce l'individuazione di quelle foto non idonee alla successiva fase di ricostruzione della scena, quali potrebbero essere quelle scattate dal drone nel passaggio tra un'altezza di volo e un'altra (ad es., durante la fase di decollo) oppure erroneamente scattate in altri momenti dell'acquisizione (si vedano a tal proposito gli esempi riportati in [Figura 10](#)).

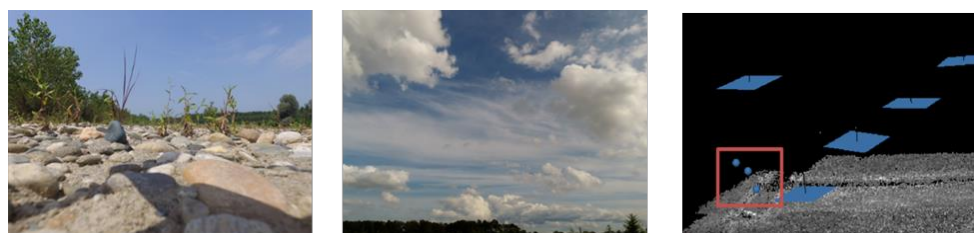



Figura 10 – Esempi di foto da eliminare prima di procedere con il processing delle immagini in PhotoScan.

In questa fase, è dunque importante eliminare queste immagini non necessarie al rilievo 3D in quanto potrebbero rallentare il processing e peggiorare la qualità dei risultati. È necessario selezionare e

scartare tramite PhotoScan queste immagini ([Figura 11](#)). Alternativamente, si consiglia di procedere all'eliminazione (o spostamento) diretto delle foto dalle cartelle di origine in cui sono state salvate. In questo modo future prove che utilizzeranno queste cartelle foto per nuovi progetti PhotoScan conterranno solo le immagini utili al processamento. Prima di procedere con i successivi step, è necessario in questa fase controllare (tramite il tasto  nella toolbar di PhotoScan; [Figura 12](#)) che il Sistema di Riferimento del progetto in PhotoScan sia settato correttamente su quello utilizzato dal GPS del drone (in questo caso, WGS84).

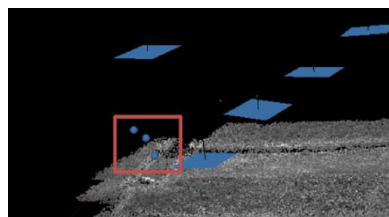


Figura 11 – Esempio di selezione e rimozione di immagini dal progetto di PhotoScan.

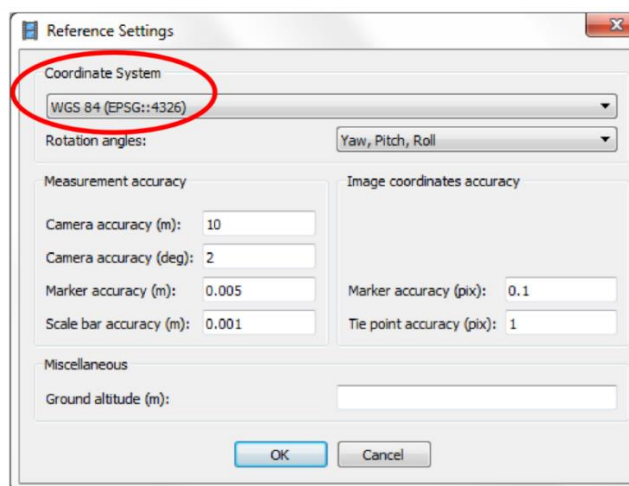


Figura 12 - Esempio di controllo del Sistema di Riferimento del progetto.

STEP 2: *Alignement*

Una volta caricate le foto in PhotoScan, occorre procedere con il loro allineamento (*“Alignment”*; [Figura 13](#)).

Risolvendo il modello stereoscopico per tutti i fotogrammi, PhotoScan ricostruisce la posizione delle camere e la geometria della scena. Nello specifico, il software ricostruisce la posizione che avevano le camere all'atto della presa (quindi definisce gli angoli di rotazione, le coordinate del centro di presa e il fattore di scala), a partire da punti omologhi in fotogrammetrie consecutive (collimazione di alcuni punti del modello stereoscopico). Per migliorare la qualità dei risultati di questo step è importante che ci sia un numero sovrabbondante di punti omologhi opportunamente distribuiti nella zona di sovrapposizione tra i diversi fotogrammi e questo aspetto dipende da come viene progettato il piano di volo (v. *piani di volo base* in [Rilievi di campo \(T1.1\)](#)). Questo step viene facilitato dalla conoscenza preliminare delle coordinate GPS del drone per ogni fotogramma ed è opportuno assicurarsi che l'opzione *“Reference preselection”* sia attiva sul drone (di solito lo è di default) al fine di usare queste informazioni.

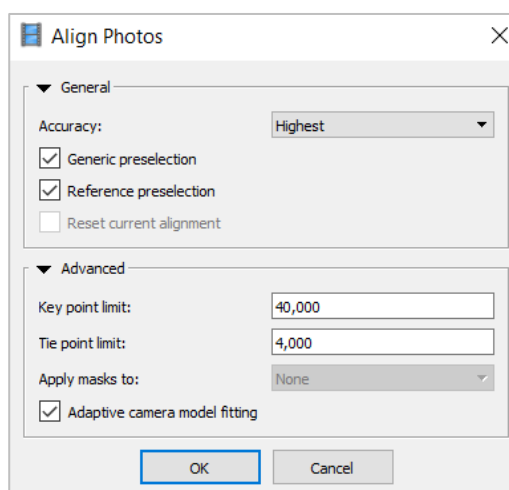


Figura 13 - Maschera di PhotoScan per l'allineamento delle foto caricate del drone.

Una volta trovate le posizioni della camera e nota la posizione di ciascun punto omologo sui fotogrammi, PhotoScan riproietta nello spazio i punti omologhi individuati, trovando la loro posizione relativa 3D e costruendo così il modello stereoscopico “*Sparse Point Cloud*” (Nuvola rada di punti). L'output dell'*Alignement* è una nuvola di punti sparsi che ricostruisce la forma e l'orientamento dell'oggetto rilevato, georeferita con una precisione dell'ordine della decina di metri (Figura 14).

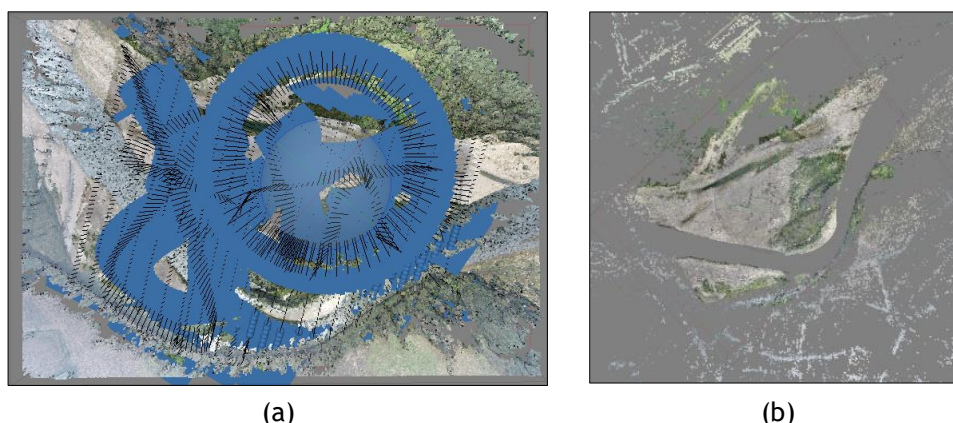


Figura 14 – Esito dello STEP “*Alignment*” per il sito PO_2018_09: (a) posizioni e orientamenti delle camere; (b) zoom sulla nuvola rada di punti (“*Sparse Point Cloud*”).

Per tutte le 18 acquisizioni elaborate, l'accuratezza è stata settata su *highest* poiché per produrre risultati il più possibile accurati questo step è fondamentale per la buona riuscita dei successivi. Per dare un'ordine di grandezza, i tempi computazionali per lo step “*Alignment*” per un sito come PO_2018_09 sono di 1-2 giorni su un Desktop dotato di processore i7-7700 di settima generazione (quad-core, 3.6 GHz) e 32 Gb DDR4. I parametri nella sezione “*Advanced settings*” sono stati lasciati di default. Per il sito PO_2018_09, si riporta nella Figura 14 la base di partenza del processo, ossia le posizioni delle camere che ricostruiscono il piano di volo effettuato, e il risultato dello step “*Alignment*” consistente nella nuvola sparsa di punti.

STEP 3: GPS points inclusion

Per passare dalla precisione dell'ordine della decina di metri del modello 3D ricostruito nell'*Alignment* a una georeferenziazione con precisione centimetrica, è necessario includere le posizioni dei punti di

appoggio a terra (target) misurate in campo con le tradizionali tecniche di rilievo topografico (si veda la sezione [Rilievo punti GPS](#)).

In questo step, si importano nel progetto di PhotoScan le coordinate geografiche (in gradi decimali WGS84) dei punti GPS misurati al suolo, caricando il relativo file di testo in formato .csv (contenente nome punto, longitudine, latitudine e altitudine). Sulla base di queste coordinate, PhotoScan suggerisce, tramite un marcatore, quali, tra tutte le foto disponibili nel progetto, è più probabile che contengano i target ([Figura 15](#) -).

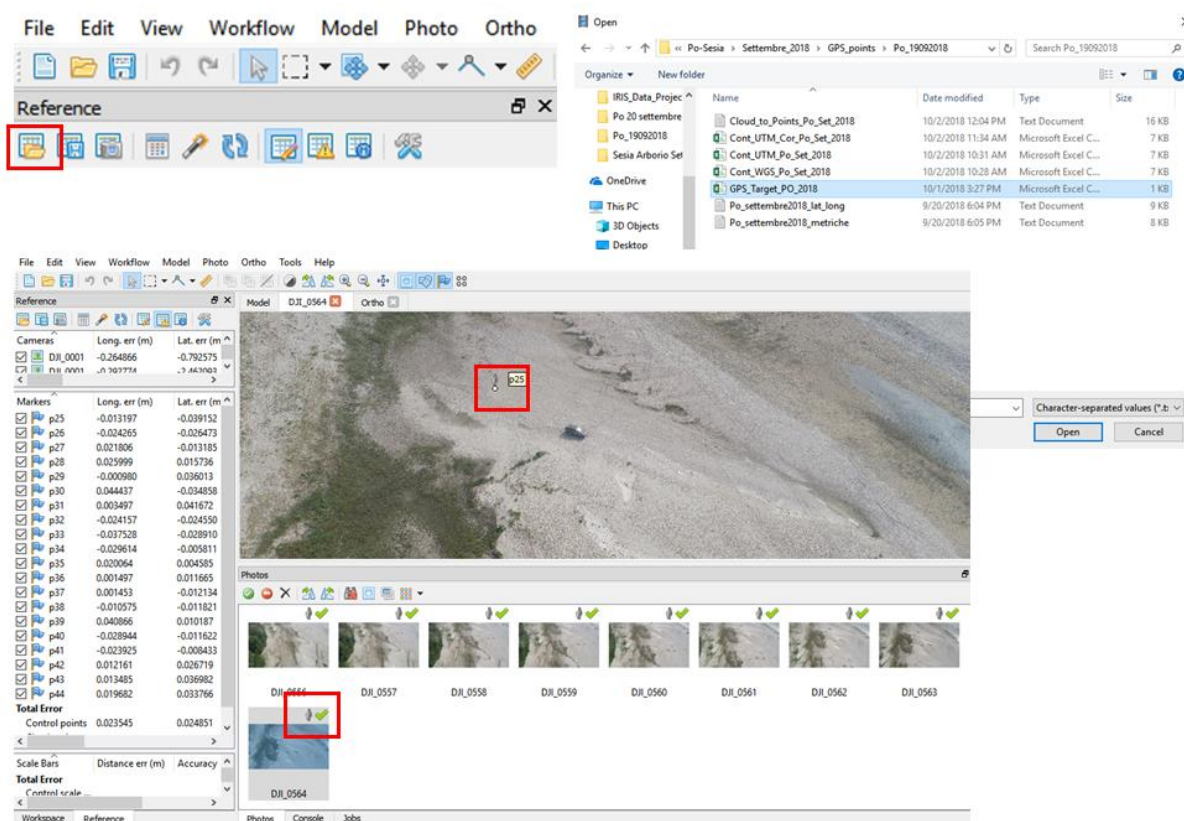



Figura 15 – Maschera di PhotoScan per l'inclusione dei punti di appoggio a terra e suggerimento da parte del software delle immagini contenenti i target e loro posizione.

Si procede verificando l'effettiva presenza del target nelle foto suggerite: occorre aprire singolarmente ogni foto, verificare la presenza del target nell'immagine e spostare manualmente il marcatore al centro del target visualizzabile al suolo. Parallelamente al riposizionamento del marker in corrispondenza del centro dei target, si aggiorna il progetto, utilizzando il tasto 'Update' . L'aggiornamento determina la migliore trasformazione di traslazione, rotazione e scala tra le coordinate del modello 3D, stimate dal processo fotogrammetrico e quelle di controllo misurate a terra (punti GPS osservati con precisione centimetrica). L'aggiornamento non cambia la forma del modello 3D, ma solo la sua dimensione, posizione e orientamento. Solitamente, per uno stesso target è necessario spostare il marcatore al centro del target in almeno tre foto. Dato che la finalità di questo step è il raggiungimento della precisione centimetrica, l'operazione di riposizionamento di uno stesso target su più foto va portata avanti finché l'errore di posizionamento di ciascun punto GPS non raggiunge un valore inferiore a 0.1 m.

Un esempio illustrativo del posizionamento di un marcatore sul sito del PO acquisito nel settembre 2018 (PO_2018_09) effettuato nella fase di inclusione dei punti GPS con la metodologia sopra descritta è riportato in [Figura 16](#).

Una volta inseriti i marcatori è possibile visualizzare la tabella dei “Markers” (si veda come esempio la [Figura 17](#)), dove sono riportati gli errori tra i dati di controllo misurati e quelli fotogrammetrici. Per una buona georeferenziazione, gli errori quadratici medi (RMSE-Root mean square error) riportati dal software (si veda la colonna Error (m) in [Figura 17](#)) devono essere inferiori a 0.1 m. Se qualche punto presenta un errore più alto di tale soglia, si dovrà valutare (eventualmente, a valle del processo di ottimizzazione delle camere dettagliato nel successivo paragrafo) se procedere all’esclusione del marker dal processo di georeferenziazione.

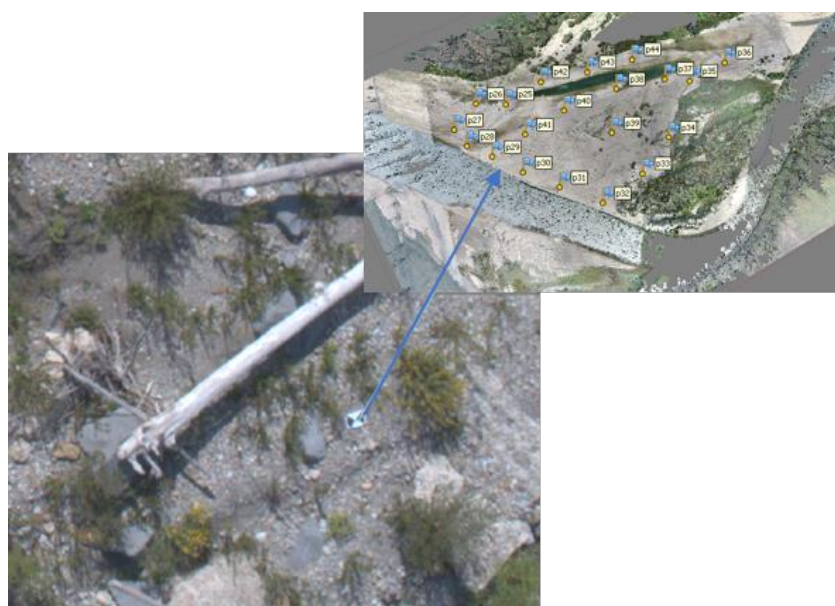


Figura 16 – Inclusione dei punti GPS e riposizionamento dei marcatori nel centro del target a terra sul sito PO_2018_09.

Markers	Long. err (m)	Lat. err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> p25	-0.013197	-0.039152	-0.033220	0.005000	0.053015	4	0.332
<input checked="" type="checkbox"/> p26	-0.024265	-0.026473	0.014699	0.005000	0.038803	4	0.910
<input checked="" type="checkbox"/> p27	0.021806	-0.013185	0.069896	0.005000	0.074396	5	0.385
<input checked="" type="checkbox"/> p28	0.025999	0.015736	-0.028794	0.005000	0.041865	3	0.123
<input checked="" type="checkbox"/> p29	-0.000980	0.036013	-0.040951	0.005000	0.054542	3	0.161
<input checked="" type="checkbox"/> p30	0.044437	-0.034858	-0.020955	0.005000	0.060240	4	0.346
<input checked="" type="checkbox"/> p31	0.003497	0.041672	-0.031887	0.005000	0.052589	3	0.218
<input checked="" type="checkbox"/> p32	-0.024157	-0.024550	0.025995	0.005000	0.043151	4	0.291
<input checked="" type="checkbox"/> p33	-0.037528	-0.028910	-0.010926	0.005000	0.048616	3	0.216
<input checked="" type="checkbox"/> p34	-0.029614	-0.005811	0.004427	0.005000	0.030502	3	0.051
<input checked="" type="checkbox"/> p35	0.020064	0.004585	0.022491	0.005000	0.030487	3	0.174
<input checked="" type="checkbox"/> p36	0.001497	0.011665	-0.079238	0.005000	0.080106	3	0.104
<input checked="" type="checkbox"/> p37	0.001453	-0.012134	0.020969	0.005000	0.024270	4	0.477
<input checked="" type="checkbox"/> p38	-0.010575	-0.011821	0.018807	0.005000	0.024602	4	0.227
<input checked="" type="checkbox"/> p39	0.040866	0.010187	0.042239	0.005000	0.059648	4	0.132
<input checked="" type="checkbox"/> p40	-0.028944	-0.011622	0.039548	0.005000	0.050368	4	0.267
<input checked="" type="checkbox"/> p41	-0.023925	-0.008433	-0.086183	0.005000	0.089839	3	0.120
<input checked="" type="checkbox"/> p42	0.012161	0.026719	-0.002380	0.005000	0.029453	4	0.339
<input checked="" type="checkbox"/> p43	0.013485	0.036982	0.004787	0.005000	0.039654	5	0.257
<input checked="" type="checkbox"/> p44	0.019682	0.033766	-0.015752	0.005000	0.042138	3	0.259
Total Error							
Control points	0.023545	0.024851	0.038479		0.051503		0.338
Check points							

Figura 17 - Esempio di Tabella dei markers per PO_2018_09.

STEP 4: Optimization cameras

In questo step il software ottimizza simultaneamente forma e georeferenziazione del modello, includendo i punti di controllo misurati a terra nella procedura di “*bundle adjustment*” ([Figura 18](#)). Si tratta di un problema di ottimizzazione tra il modello di punti 3D e i parametri di ripresa delle camere, il cui obiettivo è la minimizzazione dell’errore di proiezione (distanza euclidea) tra i punti misurati e quelli proiettati nel modello 3D. Per fare ciò, PhotoScan usa tutte le informazioni a disposizione (coordinate punti GPS e parametri della camera) e stima i parametri delle camere, raffinando e correggendo i valori di distorsione causati dalle lenti della camera e la distanza focale. Questo step si lancia dal comando “*Optimization cameras*”, avendo utilizzati i valori assegnati di default per la scelta dei parametri della camera da ottimizzare. A valle dell’ottimizzazione delle camere, si ha una riduzione nell’RMSE tra i punti di controllo GPS e quelli derivati dal processo fotogrammetrico. È per questo motivo che, come si accennava al paragrafo precedente, solo a valle di questo step di ottimizzazione si potrà decidere se eliminare o meno un punto GPS il cui errore a valle del riposizionamento dei marker è maggiore di 0.1 m.

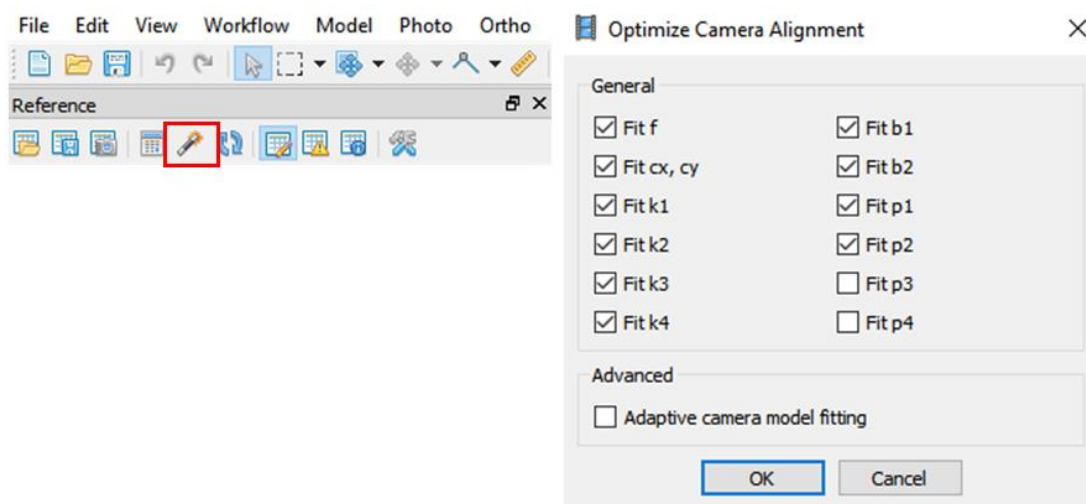


Figura 18 - Maschera di PhotoScan per l’ottimizzazione delle camere.

STEP 5: Build Dense Cloud

PhotoScan in questo step genera un modello stereoscopico a nuvola densa di punti (“*Dense Cloud*”). A partire dalla geometria del rilievo e dalla posizione delle camere, stimata con maggiore accuratezza nello step precedente, PhotoScan proietta nuovi punti x, y, z generando una nuvola densa di punti. Questo step è il più dispendioso dal punto di vista computazionale poiché il software per collimare un nuovo punto nel modello stereoscopico deve valutare tutte le possibili combinazioni e trovare la migliore posizione reciproca 3D tra tutti i punti. Costruendo la nuvola densa di punti, non viene modificata né la forma né la georeferenziazione del modello, ma vengono solo generati nuovi punti tra quelli che erano stati individuati come omologhi in fotogrammetrie consecutive nell’*Alignement*. Dato che il Dense cloud si genera a partire da determinate posizioni e parametri delle camere che sono state precedentemente ottimizzate (Step 4), se si modifica lo step di ottimizzazione delle camere, il precedente “*Dense Cloud*” viene eliminato automaticamente dal software e quindi deve essere ricostruito. Per questo step si è deciso di impostare l’accuratezza su un livello medio (“*Medium*”), poiché livelli superiori avrebbero richiesto tempi esponenzialmente più lunghi e risorse computazionali molto più gravose, producendo risultati che d’altra parte avrebbero avuto un dettaglio non necessario per gli scopi dell’attività in corso.

Per generare la “*Dense Cloud*” occorre lanciare il comando “*Build Dense Cloud*” dal menù “*Workflow*” e settare l’opzione “*Quality*” su “*Medium*” come riportato in [Figura 19](#). In [Figura 20](#) si riporta, come esempio, la nuvola densa di punti generata per il sito PO_2018_09.

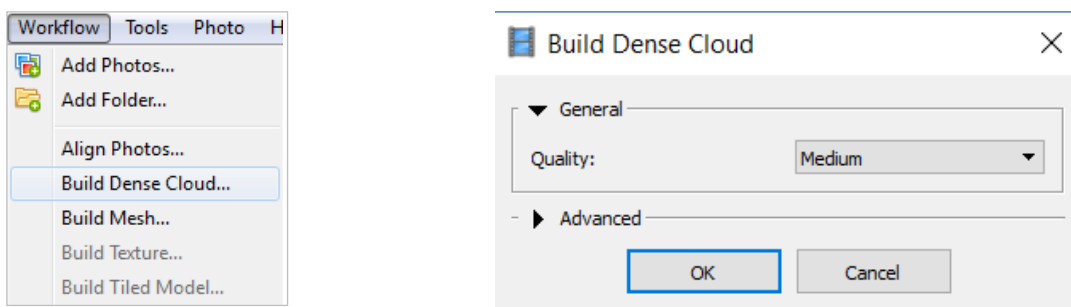


Figura 19 – Procedura per la generazione della nuvola densa di punti.

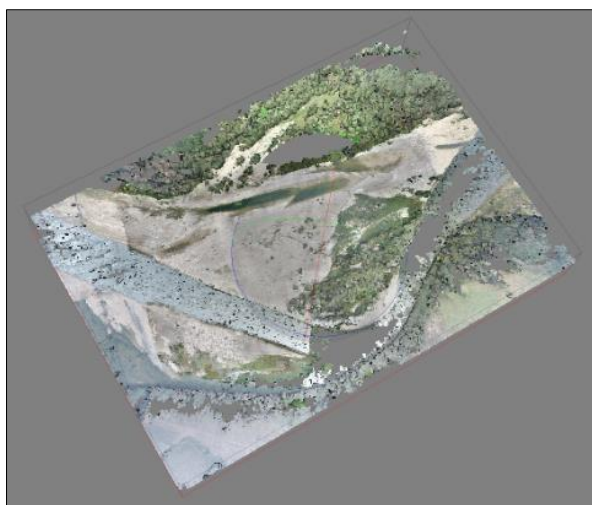


Figura 20 – Nuvola densa di punti relativa al sito PO_2018_09.

STEP 6: Build DEM

Il DEM-*Digital Elevation Model* (modello digitale del terreno) è la rappresentazione digitale tridimensionale della superficie del terreno. In PhotoScan, ogni DEM è stato generato a partire dalla nuvola densa di punti, nella risoluzione specificata, interpolando i punti della nuvola densa secondo l'algoritmo di interpolazione "*Inverse Distance Weighting*". Il DEM può essere calcolato solo per modelli georiferiti quindi occorre specificare il sistema di riferimento adottato che nel caso specifico è quello assunto per i punti GPS (UTM/WGS84, Zona 32N). Per generare il DEM occorre lanciare il comando "*Build DEM*" dal menù "*Workflow*", settare il sistema di coordinate, mentre gli altri parametri sono lasciati di default ([Figura 21](#)). In [Figura 22](#) si riporta, come esempio, il DEM relativo al sito PO_2018_09.

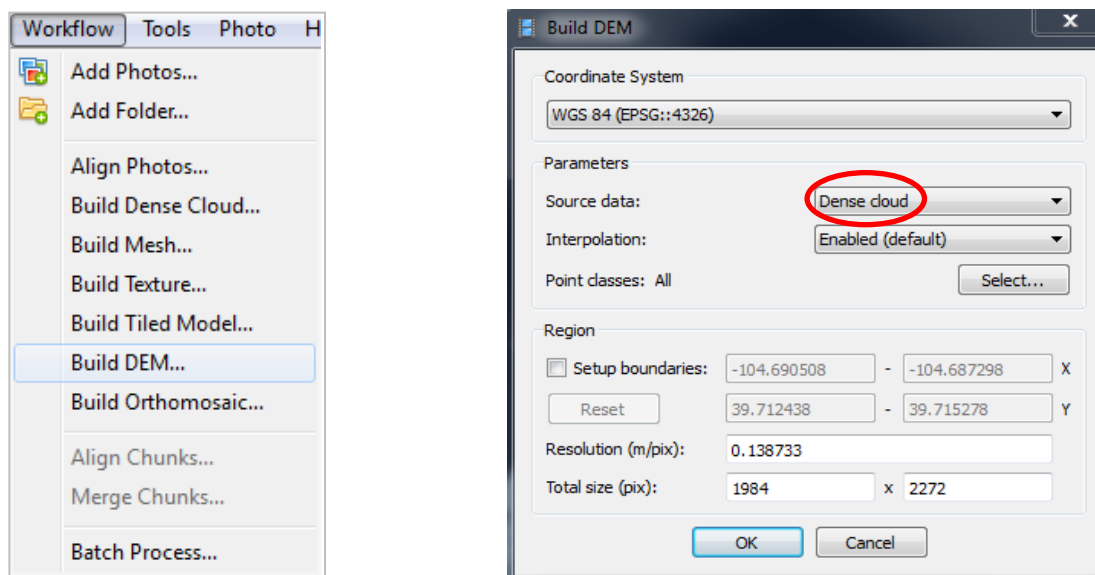


Figura 21 – Procedura per la generazione del DEM a partire dalla nuvola densa di punti.

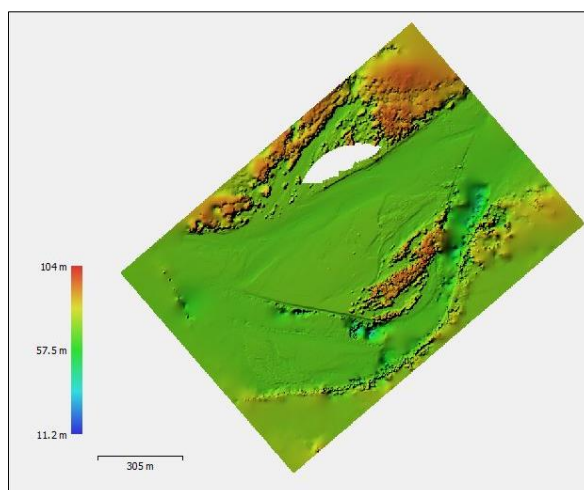


Figura 22 – DEM relativo al sito PO_2018_09.

STEP 7: Build Orthomosaic

La realizzazione di un ortomosaico (*“Build Orthomosaic”*), ossia di una ortofoto, richiede la conoscenza del modello stereoscopico orientato e delle quote al fine di mantenere costante la scala. A tale scopo, in questo step, è stato selezionato il DEM come input alla generazione dell’ortofoto (v. [Figura 23](#)), opzione diffusa ed efficiente quando si trattano dati di campagne aeree e che consente di risparmiare tempo rispetto all’opzione della *“Mesh”* come input alternativo. Inoltre si deve settare la risoluzione spaziale del raster ortofoto che verrà generato. Si ottiene un’immagine scalata, priva delle deformazioni prospettiche presenti nel fotogramma originario, dalla quale è possibile dedurre informazioni metriche. Per gli scopi di questo progetto, l’esportazione dell’ortofoto è stata effettuata con una risoluzione di 10 cm (v. [Figura 23](#)). In [Figura 24](#) è riportata, come esempio, l’ortofoto ottenuta per il sito PO_2018_09.

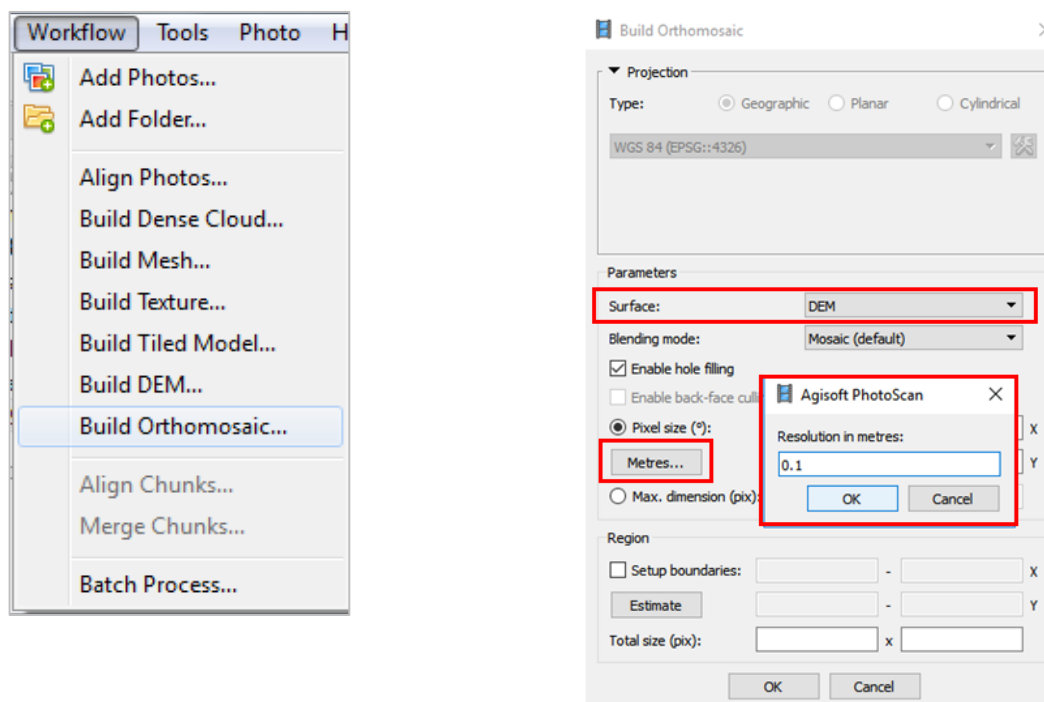


Figura 23– Procedura per la generazione dell’ortofoto e settaggio dei parametri.



Figura 24 – Ortofoto relativa al sito PO_2018_09.

STEP 8: Export orthomosaic and DEM

I prodotti di PhotoScan devono essere esportati dal progetto per essere utilizzati come verità a terra per la classificazione dei dati Sentinel-2 e Sentinel-1. Per ogni sito, le ortofoto e i DEM generati sono stati esportati nel sistema di coordinate WGS84/UTM Zona 32N, con una risoluzione di 10 cm/pixel, in formato “.tif”.

Validazione e accuratezza risultati

Per validare i prodotti di PhotoScan è stato utilizzato il programma *Cloud Compare*, un software open source per analisi GIS e fotogrammetriche (<https://www.danielgm.net/cc/>). Per ogni sito, sono stati caricati i punti GPS presi in continuo con il metodo di “Punto rapido” in coordinate UTM (si veda la sezione

Rilievo punti GPS), assicurandosi di caricare nel progetto solo i punti che non erano stati presi in corrispondenza della vegetazione e che non erano indicati con un valore di inclinazione in eccesso nel “Survey Report”. Infatti, si ricorda che il modello 3D della *Dense Cloud*, da cui poi viene generato il DEM, corrisponde in senso topografico a un DSM–*Digital Surface Model* in cui, dunque, i valori di elevazione della vegetazione sono relativi alla chioma degli alberi e non alla quota del terreno sottostante (a cui invece si riferiscono le coordinate misurate con il GPS). È stata pertanto importata la *Dense Cloud* in coordinate UTM con l’obiettivo di misurare la distanza tra i punti misurati a terra e quelli appartenenti alla nuvola densa di punti. Questa distanza, lungo le tre direzioni x, y e z, fornisce l’errore di georeferenziazione del modello ricostruito da PhotoScan. I punti usati nella validazione tramite *Cloud Compare* sono chiamati “check points” e si distinguono in ruolo e in utilizzo rispetto ai punti target o “control points”. Gli errori di distanza aggregati, media degli errori lungo i tre assi, denominati “Computed cloud-to-cloud (C2C) absolute distances” sono visualizzati in *Cloud Compare* con una scala di colori. La rappresentazione in scala di colore delle C2C absolute distances è utile per analizzare la loro distribuzione spaziale nel sito.

In [Figura 25](#) si riporta come esempio i risultati di validazioni del sito PO_2018_09 nel caso in cui si caricassero tutti i punti in continuo disponibili, compresi quelli rilevati in corrispondenza della vegetazione. Da questa figura, si può osservare che l’errore è più alto dove c’è presenza di vegetazione e il valore di distanza è coerente con l’altezza della vegetazione. In generale, questo può essere utile per vedere che sia ricostruita bene anche l’altezza della vegetazione più densa. Tuttavia, come sopra detto, non essendo questo lo scopo dell’attività, questi punti non sono stati compresi dalla validazione adottata per il progetto.

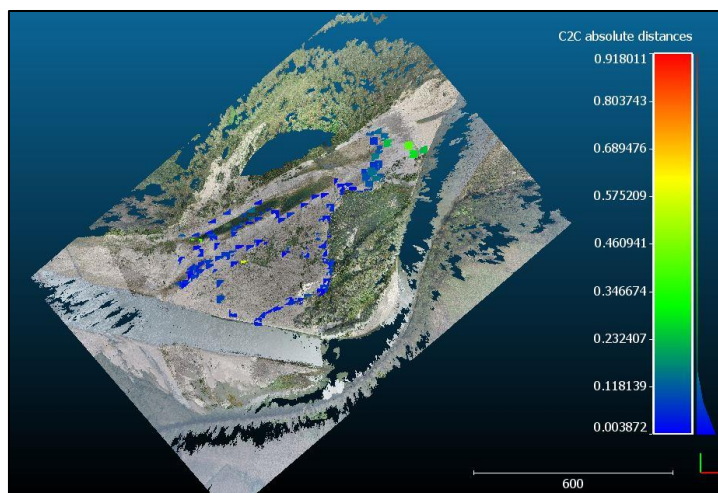


Figura 25 – Distanza (C2C absolute distances) tra i check points e la Dense Cloud generata da PhotoScan per il sito PO_2018_09.

La [Tabella 4](#) riporta i risultati ottenuti per i 18 siti studio in uscita da PhotoScan (errori rispetto ai control points) e in uscita da *Cloud Compare* (errori rispetto ai check points).

Dalla tabella dei risultati si vede che i valori degli errori sono coerenti, cioè con errori inferiori ai 10 cm indipendentemente dal sito, dalla campagna di misure o dalla metodologia di acquisizione (piani di volo). Tra i valori riportati in tabella, il più importante è quello relativo all’errore di validazione lungo la direzione z, perché da esso è desumibile l’ordine di grandezza dei processi e cambiamenti morfologici che potranno essere discriminati stimando la variazione topografica (*change detection*) tra DEM relativi allo stesso sito, ma ottenuti mediante acquisizioni effettuate in tempi diversi. Dai risultati ottenuti si ritiene che cambiamenti topografici maggiori di 10 cm potranno essere considerati maggiori dell’incertezza del dato generato e quindi stimati per questi dati di campo oggetto del progetto. Si tratta peraltro di un valore assolutamente paragonabile con quanto riportato in letteratura (Lane et al., 2003; Wheaton et al., 2010).

Tabella 4 – Precisione di georeferenziazione dei punti di controllo (da progetto PhotoScan) e dei punti di validazione (da progetto in Cloud Compare) per le 18 acquisizioni elaborate. Legenda: ND, Non disponibile.

		Agisoft Photoscan				Cloud Compare				
		GPS CONTROL POINTS ERRORS (m)				VALIDATION ERRORS (m)				
		RSE ERRORE Punti GPS	X error	Y error	Z error	X valore medio assoluto	Y valore medio assoluto	Z valore medio assoluto	valore medio TOT	N punti validazione
PO-SESIA										
Settembre 2017	PO_2017_09	0,064	0,027	0,050	0,029	ND	ND	ND	ND	ND
	SA_2017_09	0,062	0,038	0,049	0,008	0,052	0,099	0,096	0,182	67
Luglio 2017	SC_2017_07	0,066	0,029	0,040	0,043	0,021	0,021	0,036	0,052	160
Aprile 2018	SA_2018_04	0,045	0,028	0,032	0,015	0,022	0,027	0,112	0,123	59
	SC_2018_04	0,059	0,044	0,036	0,016	0,022	0,027	0,036	0,056	44
Settembre 2018	PO_2018_09	0,051	0,024	0,025	0,038	0,020	0,018	0,050	0,062	157
	SA_2018_09	0,042	0,025	0,024	0,023	0,039	0,031	0,091	0,115	129
	SC_2018_07	0,048	0,029	0,033	0,021	0,027	0,026	0,038	0,061	81
PAGLIA										
Settembre 2017	AC_2017_09	0,047	0,013	0,015	0,042	0,024	0,023	0,066	0,081	90
	AL_2017_09	0,058	0,034	0,042	0,021	0,025	0,027	0,071	0,086	126
	OR_2017_09	0,050	0,025	0,021	0,038	0,024	0,030	0,068	0,085	57
Luglio 2018	AC_2018_09	0,024	0,013	0,015	0,014	0,028	0,029	0,066	0,085	94
	AL_2018_09	0,031	0,018	0,020	0,015	0,026	0,027	0,061	0,078	43
	OR_2018_09	0,071	0,027	0,015	0,063	0,032	0,040	0,092	0,114	94
BONAMICO										
Novembre 2017	BM_2017_11	0,059	0,016	0,046	0,036	0,022	0,023	0,076	0,088	100
	BV_2017_11	0,061	0,031	0,051	0,009	0,033	0,033	0,072	0,092	17
Ottobre 2018	BM_2018_10	0,025	0,015	0,009	0,018	0,029	0,025	0,078	0,096	484
	BV_2018_10	0,031	0,022	0,013	0,018	0,029	0,032	0,055	0,079	104
RESULTS	Media TOT	0,050	0,025	0,030	0,026	0,028	0,032	0,068	0,090	

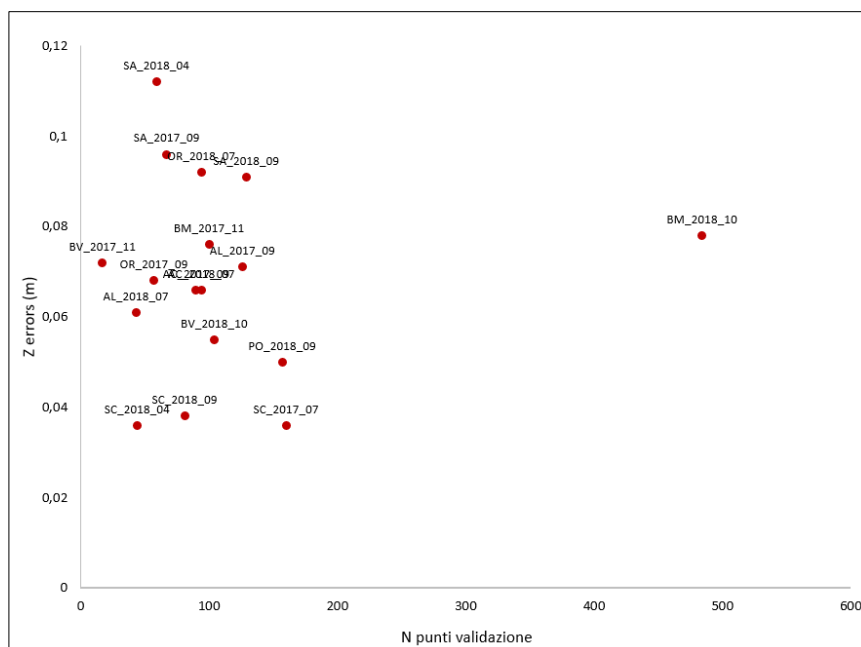


Figura 26 – Plot dell'errore verticale vs. il numero di punti di validazione per ogni sito (per acronimi sito si veda [Tabella 4](#)).

In [Figura 26](#) è riportato un plot del numero dei punti di validazione e dell'errore lungo la direzione z, per ogni sito. Si nota che l'errore non varia molto al variare del numero dei punti presi in continuo, né in

funzione del sito o della campagna di misure (2017 vs. 2018), rafforzando la robustezza dei risultati ottenuti sulla stima dell'errore. Come valore indicativo, si consiglia di raccogliere un numero minimo di 60 punti per la validazione.

Analisi dei rischi

Di seguito sono riportate alcune linee guida e limiti riscontrati nella fase di costruzione della verità a terra, da tenere in considerazione per eventuali nuove campagne.

In generale, i risultati cambiano a seconda della morfologia del sito, della stagione e dell'orario di acquisizione delle immagini. È importante considerare nella fase di programmazione dei rilievi di campo che l'ora a cui viene fatto il volo implica un certo angolo di illuminazione del sole e, nel caso in cui a tale angolo corrispondano grandi ombre, il sito rischia di essere mal ricostruito e, successivamente, mal classificato. In generale, si è visto che la presenza di molta acqua ostacola la ricostruzione della scena infatti il software non riconosce punti omologhi sul canale bagnato. È quanto occorso nel sito sul Po acquisito nell'aprile 2018, quando a causa delle portate elevate l'ampiezza del canale bagnato era piuttosto grande. In queste condizioni, il software PhotoScan non è stato in grado di ricostruire la scena, lasciando spazi vuoti e non comprendendo nell'*Alignment* le foto costituite per la maggior parte da acqua. Questa acquisizione è stata quindi scartata e non è stata utilizzata nelle successive analisi.

Dai risultati della validazione, in cui sono rappresentati con colori diversi gli errori dei punti di validazione (si veda, ad es., [Figura 25](#) e [APPENDICE I](#)), si è notato come le zone con errore più elevato sono in corrispondenza di cambi di concavità e depressioni (ad es., in canali secondari privi di acqua) e ai bordi delle acquisizioni, dove c'è una minore densità di punti. In queste zone dove la precisione è più bassa, sarà possibile misurare solo cambiamenti morfologici maggiori del valore medio di 10 cm precedentemente indicato.

In generale, le precisioni ottenute in validazione per tutti e 18 i siti sono comunque più che soddisfacenti essendo al di sotto dei 10 cm per tutti e tre gli assi (x, y e z) e per tutti i siti (si veda [Tabella 4](#)). Questo dimostra che la strumentazione e i metodi utilizzati per i rilievi di campo hanno funzionato correttamente.

Classificazione macro-unità da ortofoto drone (T1.2)

Questa sezione descrive i risultati delle attività del Task 1.2 in merito alla creazione del dataset di verità a terra per la mappatura degli habitat (macro-unità SUM) ai fini dell'estrazione dell'**indicatore 1**. Come descritto nella sezione [Quadro metodologico complessivo](#), le macro-unità morfologiche oggetto della classificazione riguardano: le unità in alveo sommerse (aree bagnate), le unità in alveo emerse (ad es., barre di sedimento, canali emersi, sponde non vegetate), la vegetazione in alveo e ripariale. Ai fini dell'estrazione dell'assemblaggio delle macro-unità SUM da satellite la "vegetazione in alveo" e la vegetazione spontanea parte della macro-unità "zona ripariale" sono state classificate come unica classe "vegetazione in alveo e ripariale", avendo caratteristiche tessiturali e spettrali simili. In un secondo momento, si verificherà l'opportunità di discriminarle grazie all'integrazione degli **indicatori di processo 4** e **5**. Allo stesso modo, le porzioni acquatiche situate nella zona ripariale del corridoio fluviale (ad es., canali secondari di pianura), laddove presenti, sono state classificate insieme alle "unità sommerse" in alveo. Inoltre, in corso d'opera si è deciso di classificare anche quella porzione di pianura alluvionale visibile dalle immagini da drone acquisite tramite il **piano di volo generale** (si veda la sezione [Acquisizione immagini da APR: Piani di volo](#)), che è occupata da unità dominate da attività antropiche, soprattutto agricole, per provare a testare la possibilità di riconoscerle e classificarle da satellite, sebbene questo obiettivo non rientra nelle finalità previste dell'accordo.

In sintesi, le immagini da drone sono state classificate nelle seguenti classi:

- 0 = NA (ombre non interpretabili o zone deformate);
- 1 = unità sommerse (principalmente in alveo);
- 2 = vegetazione in alveo (inclusa vegetazione acquatica) e ripariale;
- 3 = unità emerse (in alveo);
- 4 = elementi artificiali (ad es., strade);
- 5 = campi agricoli non vegetati (ad es., campi arati);
- 6 = campi agricoli vegetati (ad es., filari o campi con vegetazione sviluppata).

La procedura di classificazione delle ortofoto è stata svolta combinando *segmentazione* automatica e *fotointerpretazione* delle immagini secondo le fasi di seguito descritte. La *segmentazione* è una procedura di riconoscimento degli oggetti sulle immagini che consiste nel raggruppamento di pixel simili in segmenti (oggetti) unici e che consente un pre-processamento delle immagini a supporto della successiva classificazione. A seguito dei risultati di alcuni test sulla possibilità di sviluppare un classificatore automatico, si è deciso di adottare una procedura di fotointerpretazione esperta per la classificazione degli oggetti ottenuti dalla segmentazione. Sebbene più dispendiosa in termini di tempo (in media 1.5 giorni di lavoro per ortofoto), tale procedura permette di costruire in modo più accurato e dettagliato la verità a terra. L'intera procedura di classificazione è stata svolta in ambiente GIS combinando software quali Grass e ArcGis o QGis.

Segmentazione ortofoto

La segmentazione è basata sull'utilizzo del tool "*i.segment*" di GRASS (<https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/i.segment.html>), che opera mediante un algoritmo denominato "*region growing and merging*". Per ciascuna ortofoto i valori dei parametri della segmentazione sono stati settati in modo esperto, in modo da creare oggetti relativamente piccoli ma consistenti, ovvero appartenenti a una stessa tipologia di unità (es. acqua vs. sedimento), e quindi non troppo frammentati. Tali parametri sono: ***minsize***, ossia la dimensione minima dei segmenti espressa in termini di numero di pixel; ***threshold***, ossia la somiglianza spettrale tra segmenti contigui nell'aggregazione degli stessi in oggetti più grandi (nello specifico usando una distanza di similarità di 3x3 pixel). In [Tabella 5](#) si riportano i valori dei parametri per ciascuna immagine segmentata. Per ciascuna ortofoto si è inizialmente creata una maschera (vettoriale) su GIS al fine di ridurre successivamente la regione computazionale su Grass escludendo le zone più deformate dell'ortofoto di origine (si veda sotto). Nel file *Segmentazione_PO_2018_09.py* disponibile nel pacchetto digitale (directory *IRIS_Repository\GT_classificazione\Esempio_PO_2018_09*) sono riportati come esempio gli step e gli script di segmentazione ed esportazione dei segmenti per l'ortofoto del Po (PO_2018_09). Le maschere per ridurre la regione computazionale su Grass sono disponibili alla directory *IRIS_Repository\GT_classificazione\SHp_input*.

Tabella 5 - Parametri utilizzati per la segmentazione di ciascuna ortofoto su GRASS (tool *i.segment*). Legenda: SA, Sesia Arborio; SC, Sesia Caresana; PO, Po; AC, Acquapendente; AL, Alleronia; OR, Orvieto; BM, Bonamico Monte; BV, Bonamico Valle. Per le date delle campagne di misura si veda la [Tabella 2](#).

Sito	Campagna 1		Campagna 2		Campagna 3	
	Minsize	Threshold	Minsize	Threshold	Minsize	Threshold
SA	5000	0.6	5000	0.6	5000	0.6
SC	5000	0.8	5000	0.8	8000	0.8
PO	6000	0.8	6000	0.8	6000	0.8
AC	5000	0.7	5000	0.5	ND	ND
AL	4000	0.4	5000	0.7	ND	ND
OR	4000	0.3	5000	0.6	ND	ND
BM	8000	0.85	4000	0.3	ND	ND
BV	6000	0.6	4000	0.6	ND	ND

Classificazione ortofoto

La classificazione manuale tramite fotointerpretazione è stata effettuata su ArcGis a una scala compresa tra 1:400 e 1:2000. La procedura include:

1. Salvataggio del vettoriale con i segmenti esportato da Grass nella directory **IRIS_Repository\GT_classificazione\Esempio_PO_2018_09**;
2. Aggiunta del campo 'Class' alla tabella degli attributi (formato del campo: *integer*);
3. Modifica manuale di alcuni poligoni per migliorare la delineazione dei segmenti (ad es., separare in alcuni casi vegetazione e acqua o sedimento e acqua);
4. Attribuzione manuale, per ciascun segmento, della macro-unità di appartenenza secondo le classi descritte sopra;
5. Importazione su Grass per post-processing (pulitura e accorpamento di segmenti appartenenti alla stessa classe) ed esportazione del raster dei campi di *ground truth* (GT). Nel file **Classificazione_PO_2018_09.py** del pacchetto digitale (directory **IRIS_Repository\GT_classificazione\Esempio_PO_2018_09**) sono riportati a titolo esemplificativo gli step e gli script di post-processing ed esportazione del raster dei campi di *ground truth* per l'ortofoto del Po (PO_2018_09).

Classificazione unità morfologiche SUM da ortofoto APR

In [Figura 27](#) si riportano la classificazione delle unità morfologiche SUM per il sito del PO _2018_09, ossia di quelle unità che compongono le macro-unità descritte nella sezione precedente e che all'interno del SUM sono delineate e caratterizzate a livello base. Nello specifico: in A, sono riportate le macro-unità come classificate per gli scopi di questa relazione; in B, ai poligoni in A è associata la classificazione dei tipi di macro-unità secondo il SUM (es. si nota l'ulteriore distinzione rispetto ai poligoni in A tra alveo principale (C) e secondario (S) e la distinzione tra vegetazione in alveo (V) e zona ripariale (F)); in C, le macro-unità sono classificate in unità morfologiche secondo il SUM; in D, si ipotizza una ulteriore distinzione tra barra laterale (EA) e canale emerso (ED).

Questo esempio mostra le potenzialità offerte dalle ortofoto ad alta risoluzione prodotte tramite l'acquisizione di immagini da drone per la classificazione delle unità SUM. La [Figura 27](#) mostra che la semplice classificazione manuale da immagini drone RGB non permette la netta distinzione di tutte le unità morfologiche, come, richiesto da metodologia SUM. Per esempio, nel caso delle unità morfologiche nella

pianura alluvionale, queste possono essere classificate solo a livello di macro-unità F (ovvero “zona ripariale”; Rinaldi et al., 2016b). Allo stesso modo, il limite spaziale tra unità di canale e unità di pianura è ipotizzato sulla base della tessitura, colore e posizione dei poligoni, ma necessiterebbe un ulteriore approfondimento. Inoltre, solo tramite le ortofoto non è nemmeno possibile una distinzione tra unità emerse complesse situate a quote topografiche diverse, come per esempio tra la barra laterale e il canale emerso mostrati in [Figura 27D](#). Infine, nel caso specifico dell'alveo del PO_2018_09, che possiede delle profondità importanti, non è possibile ipotizzare nessuna distinzione tra tipi di unità di canale all'interno delle macro-unità sommerse (es. sistema di dune, *pool*).

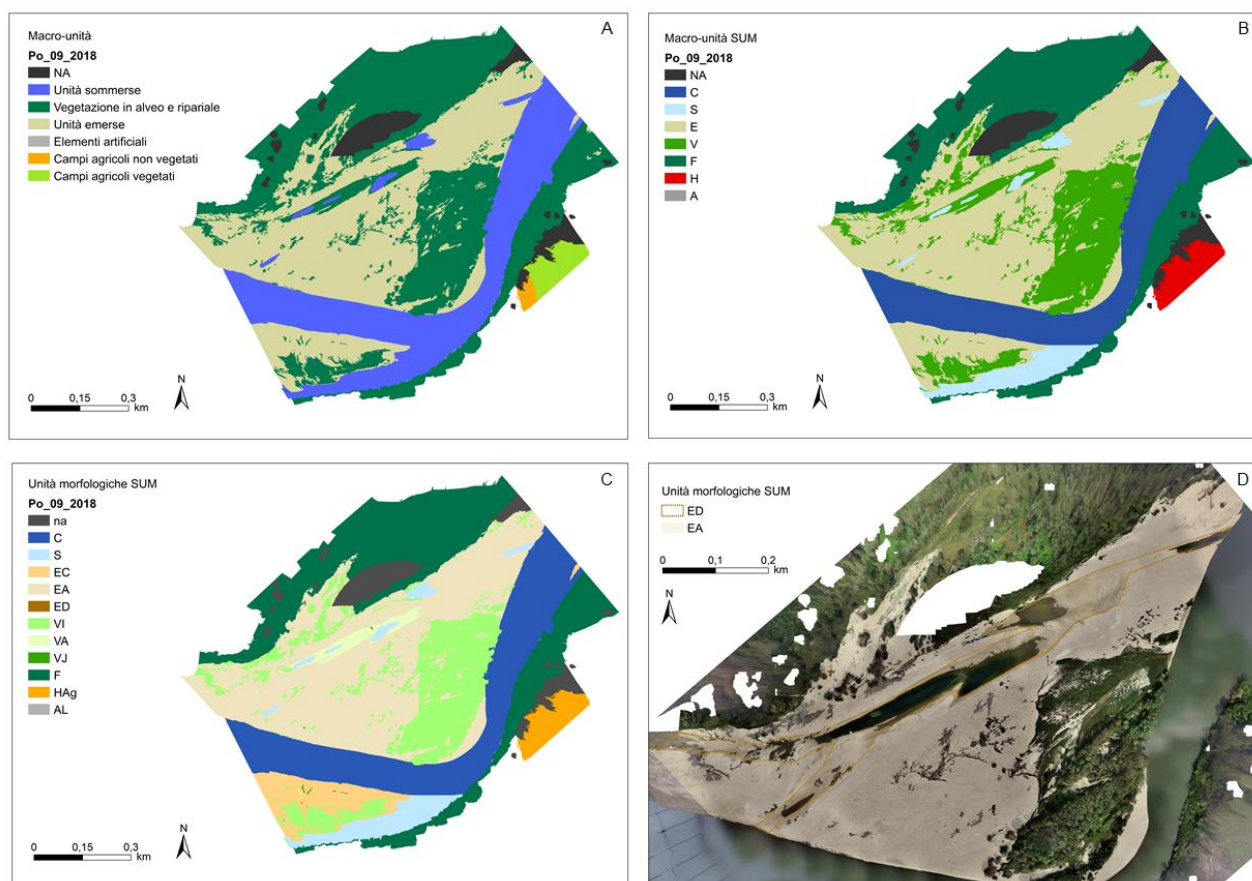


Figura 27 - Esempio di classificazione di unità morfologiche SUM (Rinaldi et al., 2016b) a partire dall'ortofoto del sito PO_2018_09 prodotta nell'ambito delle attività dell'accordo. A, macro-unità come classificate per gli scopi di questa relazione. B, classificazione dei tipi di macro-unità secondo il SUM: C = canale principale; S = canale secondario; E = unità emerse; V = vegetazione in alveo; F = zona ripariale; H = zone dominate da attività antropiche; A = elementi artificiali. C, classificazione delle unità morfologiche secondo il SUM: canale principale; S = canale secondario; EC = barra laterale; EA = barra centrale; ED = canale emerso; VI = isola; VA = vegetazione acquatica; VJ = accumuli di materiale legnoso grossolano; F = zona ripariale; HA = zona agricola; AL = protezioni di sponda. D, distinzione tra barra laterale (EA) e canale emerso (ED).

Una netta delineazione di tutte le unità morfologiche, almeno quelle emerse, potrà essere risolta integrando la classificazione da immagini RGB, l'informazione topografica derivata dal DEM ([Figura 27D](#)) e, se necessario, con i sopralluoghi in campo come indicato in Rinaldi et al. (2016b). È tema di ricerca futura esplorare le potenzialità di sviluppare classificatori automatici delle unità SUM da immagini drone che integrano l'informazione spettrale RGB e quella topografica da DEM (Demarchi et al. 2017, Bizzi et al. 2016). La scelta delle macro-unità da classificare nel presente lavoro utilizzando dati S2 è stata fatta in funzione di cosa è potenzialmente visibile e classificabile da questi dati. Per esempio, non si cerca di discernere tra alveo principale e secondario ma si preferisce costruire un classificatore capace di identificare le unità sommerse in ogni sito e per ogni stagione, indipendentemente, per esempio, dal grado di torbidità

dell'acqua, poiché si ritiene questo un obiettivo raggiungibile data l'informazione spettrale disponibile (si veda risultati nella sezione [Classificatore S2](#)). Lo studio della traiettoria temporale di queste macro-unità proposte per la classificazione da S2 potrebbe infine generare un'informazione utile a discernere tipi fluviali per i quali a specifiche traiettorie di macro-unità corrispondono specifici assemblaggi di unità morfologiche. Questo è un argomento che verrà in parte affrontato nell'ultimo anno di progetto, ma che necessiterà, in futuro, di ulteriori approfondimenti e validazioni.

Calcolo granulometria (T1.3)

In ogni sito, la caratterizzazione della granulometria è stata effettuata utilizzando la tecnica del “*photosieving*” sulle immagini da drone prese a bassa altitudine sulle barre di sedimento (v. **piano di volo di dettaglio**; [Acquisizione immagini da APR: Piani di volo](#)). In campo, a valle dell'esecuzione del **piano di volo base** (o eventualmente del **piano di volo generale**) si individuano le zone idonee su cui procedere con l'acquisizione del **piano di volo di dettaglio**, impostando le camere perpendicolari al suolo a circa 5 m di altezza. Le zone adatte a tale scopo sono le aree di sedimento prive di vegetazione, lontane dal canale bagnato del fiume e distanziate tra di loro di circa 20 m. Ove possibile, è buona pratica acquisire foto a bassa quota a monte, al centro e a valle della barra di sedimento per rappresentare l'eterogeneità granulometrica del sito. Le foto acquisite per la verità a terra della granulometria sono state anch'esse caricate nel progetto Photoscan. Tuttavia, al fine di ricavarne la scala, è necessario che esse siano comprese nell'*Alignement*. Per garantire che tali foto siano ricomprese nell'*Alignement* occorre che nel piano di volo si effettuino, nelle zone di interesse per la caratterizzazione granulometrica, voli anche a 20 m oltre a quelli a 5 m (per maggiori informazioni si rimanda alla sezione [Acquisizione immagini da APR: Piani di volo](#)). Al fine di ottenere la scala delle immagini, a valle dello step “*optimization cameras*” (v. [STEP 4: Optimization cameras](#)), sono state salvate dal progetto PhotoScan le altezze delle camere e il valore della distanza focale (in pixel). Le altezze delle camere e la *Dense Cloud* sono state importate in *Cloud Compare* e sono state calcolate le distanze reciproche tra questi due prodotti, ottenendo così l'altezza del drone (in m) all'atto della presa. Quindi, è stata calcolata la scala delle immagini a terra (mm/pixel) conoscendo l'altezza del drone e la lunghezza focale. Altrimenti, è consigliabile porre a terra un righello o un oggetto di lunghezza nota per poter successivamente ricavare la scala delle foto. Il riferimento bibliografico per la metodologia di estrazione della scala è Carboneau et al. (2018). Una volta nota la scala delle immagini, è stato utilizzato il software BASEGRAIN (Detert and Weitbrecht, 2012), per misurare la granulometria in ogni foto. Questo software consente, settando una serie di parametri, di calcolare automaticamente il diametro di ciascun grano compreso nell'immagine caricata e di estrarre da ciascuna immagine i percentili della distribuzione granulometrica dei diametri del campione. La procedura di misura prevede la scelta di diversi valori di soglia per discriminare tra grani ed interstizi, in base ai valori di intensità dei pixel (Detert and Weitbrecht, 2012). Il valore dei parametri da settare varia da immagine ad immagine a seconda dell'illuminazione della foto, dell'eterogeneità dei grani in termini di dimensione, colore e forma. Si procede quindi in modo esperto finché non si ottengono risultati coerenti con quanto visibile ad occhio nudo sulla foto (procedura interattiva).

Sulla base delle analisi effettuate, si è notato che i grani creati dal software sono coerenti con la categorizzazione in grani fatta dall'occhio umano guardando la foto, quando l'immagine caricata è costituita da grani di dimensione omogenea, forma ellissoidale e l'illuminazione genera moderate ombre tra i grani. Si consiglia dunque di selezionare e ritagliare zone della foto con queste caratteristiche. I risultati ottenuti utilizzando BASEGRAIN, rispetto ad altri software per *photosieving* o ad altre tecniche di campionamento, sono comparabili (Detert and Weitbrecht, 2012, 2013) e sufficienti per gli scopi del presente accordo. Si ricorda, inoltre, che con questa metodologia non è possibile misurare valori di diametro inferiori alla dimensione del pixel dell'immagine (qui 1.7 mm, nel caso di foto prese a quote tra i 4 e i 7 m) risultando

quindi inadatta alla misura di granulometria fine (ossia sabbia, limo, essendo 2 mm il limite superiore per la sabbia). Per la caratterizzazione dei siti oggetto di studio, prevalentemente ad alveo ghiaioso, la distribuzione granulometrica della parte ghiaiosa è un parametro fondamentale per lo studio del trasporto solido di fondo, e le dinamiche d'alveo in genere. Per i siti oggetto di studio, dove è stata applicata questa metodologia, i parametri dei vari step di BASEGRAIN sono stati settati seguendo le linee guida specificate in Detert and Weitbrecht (2013) a cui si rimanda per l'esecuzione della metodologia. In sintesi, l'immagine viene in un primo momento trasformata in scala di grigi e poi segmentata in 5 step consecutivi. I primi tre step sono specificatamente dedicati alla discriminazione degli interstizi (parametri significativi da definire in base all'immagine sono: dimensione e soglia del filtro e % di connessione tra interstizi trovati nei vari step); lo step 4 è dedicato alla separazione delle aree dei singoli grani avendo cura di non segmentare successivamente i grani (soglia consigliata tra 25-100 pixel e lunghezza minima dei segmenti che dividono i grani tra 0-100 pixel); nello step 5 i grani individuati vengono approssimati a un'ellissi e l'asse minore viene usato come valore rappresentativo dei diametri dei grani, facendo attenzione al numero minimo di pixel per grano (di norma si consiglia 23 pixel; Graham et al., 2005). In [Figura 28](#) si riporta un esempio dei risultati di BASEGRAIN per il sito del PO_2018_09. Nell'[APPENDICE I](#), si riportano i risultati ottenuti per ogni acquisizione.

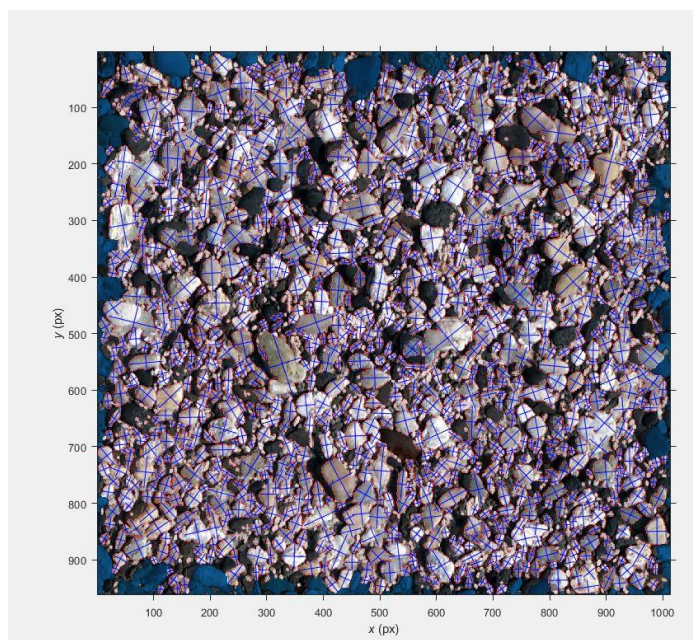


Figura 28. Esempio di risultato del software Basegrain applicato alle immagini a bassa quota nel sito del PO_2018_09.

Non tutti i siti sono risultati adatti per l'applicazione del software BASEGRAIN. Ad esempio, nei siti della Calabria (fiumara Bonamico) è stato difficile caratterizzare i grani a causa della troppa eterogeneità. Per una stessa immagine si va infatti dalla sabbia alla ghiaia grossolana (>10 cm). L'applicazione diretta di BASEGRAIN non è qui possibile ed è necessario un pre-processamento per la suddivisione dell'immagine in tre categorie (sabbia, ghiaia fine e ghiaia grossolana). Anche nei siti dove la barra è ricca di vegetazione in stadi giovanili (come nei siti del Paglia) l'applicazione di BASEGRAIN non è possibile. In questi casi è consigliabile procedere con un rilievo di campo manuale con tecniche di *pebble counting*, come quelle descritte in Wolman (1954).

Nel presente accordo, la caratterizzazione granulometrica da drone ha come finalità la definizione della verità a terra per esplorare la possibilità di classificare la granulometria media dai dati multispettrali di S2. Questa tecnica è perciò applicabile solo laddove le aree di sedimento sono di granulometria omogenea, prive di vegetazione e con estensione dell'ordine dei 100 m² o più, che è l'unità spaziale minima

rilevata dai dati di S2. Per questa ragione, la granulometria non è stata caratterizzata nelle barre dei siti di studio che non garantivano tali caratteristiche.

Classificazione macro-unità da Sentinel-2 (Task 2.2 e in parte T4.1)

I dati Sentinel-2

I satelliti Sentinel-2 (S2) acquisiscono immagini multispettrali della superficie terrestre nelle lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso riflesso. Il primo satellite, Sentinel-2A, è stato lanciato il 23 giugno 2015, Sentinel-2B è stato lanciato il 7 marzo 2017. I satelliti Sentinel-2 sono equipaggiati con il *MSI-MultiSpectral Instrument* in grado di acquisire 4 bande nel visibile e vicino infrarosso con risoluzione spaziale di 10 m, 6 bande nell'infrarosso con risoluzione spaziale di 20 m e 3 bande con risoluzione di 60 m, di cui una nel blu e due nell'infrarosso (si veda [Tabella 6](#)). Il sorvolo di uno stesso punto sulla superficie terrestre sul territorio italiano con lo stesso angolo di visuale avviene circa ogni 5 giorni. Alle latitudini più alte il sorvolo della superficie è più frequente, ma con differenti angoli di visuale.

Per il presente lavoro si è utilizzato il prodotto S2-Level2A: queste immagini sono fornite geo-referenziate e a valle di un processo di correzione atmosferica effettuato con il software Sen2Cor messo a disposizione dal programma Copernicus. Il prodotto analizzato per la presente attività è composto, al momento, dalle immagini in formato raster a 10 m per le bande nel visibile e vicino infrarosso (B2, B3, B4, B8) e a 20 m per le bande del visibile (B2, B3 e B4 ricampionate) e dell'infrarosso (B5, B6, B7, B8A, B11 e B12).

Tabella 6 – Bande spettrali, lunghezze d'onda e risoluzione spaziale per le immagini Sentinel-2.

Banda	λ centrale (nm)	Bandwidth (nm)	Risoluzione spaziale (m)
B1	443	20	60
B2	490	65	10
B3	560	35	10
B4	665	30	10
B5	705	15	20
B6	740	15	20
B7	783	20	20
B8	842	115	10
B8a	865	20	20
B9	945	20	60
B10	1380	30	60
B11	1610	90	20
B12	2190	180	20

Obiettivo della Classificazione

La classificazione delle macro-unità da S2 fa parte delle attività dei Task 2.2 e 4.1. L'obiettivo è quello di creare un classificatore delle macro-unità morfologiche da S2 per supportare l'estrazione dell'**indicatore 1**, ossia la mappatura dell'assemblaggio delle macro-unità. Si ricorda che le macro-unità morfologiche oggetto della classificazione sono: le unità in alveo sommerse (aree bagnate), le unità in alveo emerse (ad es., barre di sedimento, canali emersi, sponde non vegetate), la vegetazione in alveo e ripariale. L'intento è quello di individuare all'interno del corridoio fluviale, in maniera obiettiva a partire da S2, queste macro-unità fondamentali dei processi in alveo. Data la risoluzione spaziale dei dati S2 a 10 m e 20 m queste macro-

unità sono visibili e possono essere classificate sulla base dell'informazione spettrale nel visibile, e infrarosso per fiumi che hanno una larghezza media dell'alveo di magra $> 20 \div 30$ m oppure un alveo attivo > 30 m. Infatti, come detto precedentemente, la scelta dei siti per la sperimentazione è stata vincolata da questi limiti di larghezza (si veda anche la sezione [Quadro metodologico complessivo](#)). In particolare, si è scelto di adoperare un criterio meno restrittivo basato sulla larghezza dell'alveo attivo al fine di includere i siti di Acquapendente e Orvieto (per maggiori dettagli si veda la Relazione tecnica intermedia n.1) proprio al fine di stimare limiti e applicabilità del classificatore. Le unità morfologiche, ossia quelle forme fluviali con caratteristiche morfologiche distinte e dimensioni significative, create da erosione o deposizione di sedimenti, spesso in associazione con vegetazione (e.g., *riffle*, barra laterale, isola di vegetazione, terrazzo recente; Rinaldi et al., 2016b), sono le unità di maggiore rilevanza per la classificazione dell'habitat fluviale. Tuttavia, queste unità richiederebbero dati a una risoluzione spaziale inferiore al metro, a differenza delle macro-unità. Resta comunque di indubbia utilità sviluppare dei metodi per mappare almeno le macro-unità, dato che rappresentano, all'interno del SUM, il livello gerarchico superiore rispetto alle unità morfologiche, all'interno del quadro metodologico multi-scala (si veda anche sezione [Classificazione unità morfologiche SUM da ortofoto APR](#) e [Figura 27](#)), e considerato che i dati S2 sono gratuitamente disponibili dal Programma Copernicus ogni 5 giorni sull'intero territorio nazionale. L'obiettivo finale è quindi quello di creare un classificatore capace di identificare alla scala del tratto (ossia quella porzione di fiume che presenta condizioni al contorno, portate liquide e solide sufficientemente uniformi, in modo tale da determinare una certa omogeneità in termini di caratteri morfologici e di comportamento; Rinaldi et al., 2016a) la traiettoria temporale dell'areale di queste macro-unità. Questa informazione è necessaria per identificare i processi in alveo e le traiettorie future. In particolare, loro assemblaggio alla scala di tratto (ad es., alveo di piena o *bankfull*) e la loro dinamica sono indicatori rilevanti per l'analisi idromorfologica secondo la metodologia IDRAIM. Questi temi saranno parte integrante delle attività relative ai Task 3, 4 e 5 previste nell'ultimo anno di progetto ai fini dell'estrazione degli indicatori di processo (si veda sezione [Avanzamento delle attività: step futuri](#)). L'obiettivo in questa sezione è testare la fattibilità dello sviluppo di un classificatore di queste macro-unità che sia applicabile su tutto il contesto nazionale e in ogni stagione dell'anno. Per questa ragione si utilizzeranno, come verità a terra, tutte le ortofoto generate dalle acquisizioni APR effettuate da Nord a Sud d'Italia in contesti e stagioni differenti (per una lista dei siti e delle date di acquisizione si veda la [Tabella 8](#)) e classificate nell'ambito delle attività della Task 1.2 (si veda sezione [Classificazione macro-unità da ortofoto drone \(T1.2\)](#)) e successivamente ricampionate a 10 e 20 m per consistenza con la risoluzione spaziale di S2 (Task 2.2). Di seguito sono descritti il tipo di classificatore sviluppato e i risultati ottenuti.

Classificatore S2

Classificatore: calibrazione

Il classificatore che si è scelto di sviluppare lavora a livello del singolo pixel (*pixel-based*): il modello classifica il singolo pixel di un'immagine raster e utilizza come predittori i valori multispettrali registrati da S2 (si veda [Tabella 6](#)). Il modello proposto è un algoritmo statistico basato su dati (*data-driven*) che viene calibrato sulla base della classificazione manuale dei dati APR (si veda sezione [Classificazione macro-unità da ortofoto drone \(T1.2\)](#)). Il primo passo consiste nel ricampionare alla risoluzione di S2, cioè 10 m e 20 m, le ortofoto classificate derivate dalle acquisizioni APR che hanno risoluzione di 10 cm per pixel, allineando i pixel a queste ultime (si veda come esempio la [Figura 29](#)). Il criterio utilizzato per ricampionare prevede di assegnare a ciascun pixel S2 la classe presente con maggiore frequenza nel raster generato da APR con risoluzione 10 cm x 10 cm. Questa operazione è stata compiuta tramite uno script Python da utilizzare in ambiente GIS-Grass. Per ogni acquisizione è stato prodotto un apposito script denominato

`acronimo_acquisizione_GT.py` (per acronimo acquisizione si veda [Tabella 8](#)), reperibile nel pacchetto digitale sotto la directory `IRIS_Repository\S2_classifier\Python_scripts`. Nello stesso file sono presenti anche le operazioni da compiere in ambiente GIS-Grass per creare una maschera delle immagini S2 sulla base dell'ortofoto APR ed estrarre quindi la matrice di dati usata per la calibrazione del modello. Un esempio di tale matrice è riportato in [Tabella 7](#): la matrice ha una colonna per ogni banda utilizzata dal modello come predittore (v. B2_10m, B3_10m, etc.) e una colonna iniziale (denominata Ground-Truth, GT) che riporta la verità a terra derivata da ortofoto APR, nell'esempio la classe GT 2 identifica la vegetazione in alveo e ripariale.

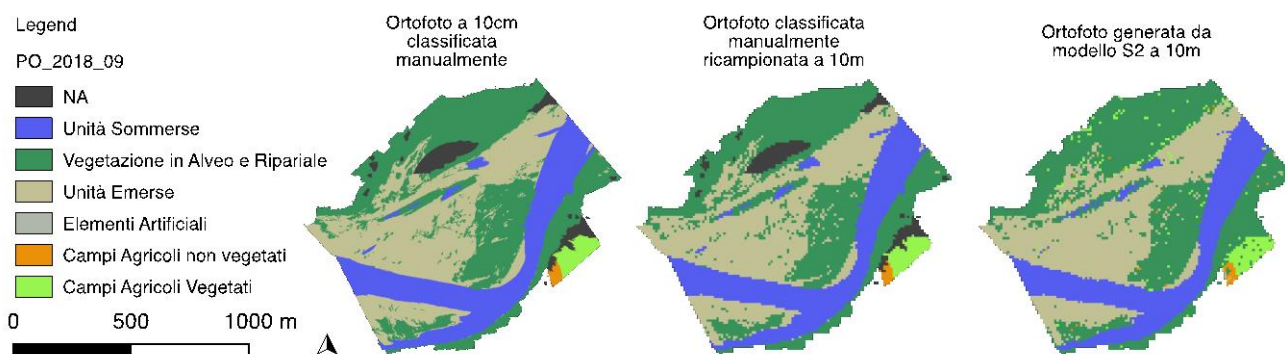


Figura 29 – Acquisizione PO_2018_09, da sinistra verso destra: Ortofoto APR a 10 cm classificata manualmente, stessa ortofoto con classificazione ricampionata a 10 m, ortofoto generata dal classificatore S2 a 10 m.

Tabella 7 - Estratto della matrice di calibrazione del modello: riporta le bande spettrali usate come predittori e la verità a terra (colonna Ground-Truth, GT) derivata dall'ortofoto APR ricampionata a 10 m (si veda anche la [Figura 29](#)).

GT	B2_10m	B3_10m	B4_10m	B8_10m
2	200	404	213	2807
2	206	452	244	2923
2	177	384	242	2768
2	232	424	287	2911
2	244	435	279	3234
2	257	467	283	3222
2	197	429	256	2921
2	207	432	298	2951
2	202	456	276	2873
2	240	453	292	3076
2	185	404	208	3218
2	249	440	283	3373
2	258	481	269	3496

Le date delle immagini S2 utilizzate sono riportate in [Tabella 8](#). Sono state selezionate le immagini disponibili più vicine alla data dell'acquisizione da APR, escludendo quelle che presentavano copertura di nubi. Inoltre, si è cercato di eliminare date immediatamente consecutive a giorni con precipitazioni piovose

per evitare che le S2 fossero influenzate da un'eccessiva umidità del suolo. Sono stati calibrati due classificatori: uno che utilizza tutte le bande disponibili con risoluzione spaziale a 20 m e uno che utilizza tutte quelle disponibili con risoluzione spaziale a 10 m. Come algoritmo è stato utilizzato un *Random Forest Classifier*, utilizzando le librerie di *machine learning* *scikit-learn* (<https://scikit-learn.org/stable/index.html>) messe a disposizione gratuitamente in ambiente Python, e, nello specifico, un regressore del tipo *RandomForestClassifier*. Nella directory *IRIS_Repository\S2_classifier\Python_scripts* del pacchetto digitale si trovano i due script, denominati *S2_classifier_20m.py* e *S2_classifier_10m.py*, che possono essere utilizzati per ripetere la calibrazione.

Tabella 8 – Data di acquisizione delle immagini APR e S2 utilizzate per la calibrazione del modello. TMR, TMQ, TQN, SWC corrispondono al nome dei Tiles S2 utilizzati.

Acronimo	Sito	APR Data acquisizione	S2A/S2B Data acquisizione	Tiles
SA_2017_09	Sesia Arborio	17/09/17	24/09/17	TMR
SC_2017_07	Sesia Caresana	19/07/17	06/07/17	TMR
PO_2017_09	Po	16/09/17	24/09/17	TMQ
AC_2017_09	Acquapendente	20/09/17	21/09/17	TQN
AL_2017_09	Allerona	18/09/17	21/09/17	TQN
OR_2017_09	Orvieto	19/09/17	21/09/17	TQN
BM_2017_11	Bonamico monte	15/11/17	21/11/17	SWC
BV_2017_11	Bonamico valle	16/11/17	21/11/17	SWC
SA_2018_04	Sesia Arborio	18/04/18	17/04/18	TMR
SC_2018_04	Sesia Caresana	16/04/18	17/04/18	TMR
AC_2018_07	Acquapendente	17/07/18	20/07/18	TQN
AL_2018_07	Allerona	16/07/18	20/07/18	TQN
OR_2018_07	Orvieto	17/07/18	20/07/18	TQN
SA_2018_09	Sesia Arborio	21/09/18	24/09/18	TMR
SC_2018_09	Sesia Caresana	22/09/18	24/09/18	TMR
PO_2018_09	Po	20/09/18	24/09/18	TMQ
BM_2018_10	Bonamico monte	24/10/18	22/10/18	SWC
BV_2018_10	Bonamico valle	23/10/18	22/10/18	SWC

Classificatore: validazione

I risultati della validazione sono stati fatti per due modelli con risoluzione spaziale diversa: a 10 m, denominato S2_10m, e a 20 m denominato S2_20m. Il modello S2_10m utilizza come ingressi le bande nel visibile e vicino infrarosso, ossia le seguenti quattro bande: B2, B3, B4, B8 (si veda [Tabella 6](#)). Mentre il modello S2_20m ha nove bande in ingresso: B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 e B12, (si veda [Tabella 6](#)). La [Figura 30](#) riporta i risultati della matrice di confusione, mentre la [Tabella 9](#) riporta una sintesi della precisione della classificazione. Come indicatori statistici di precisione del classificatore si usano:

- *Precision*, che è il rapporto $TP/(TP+FP)$, dove TP sono i veri positivi (*True Positives*) e FP i falsi positivi (*False Positives*). Questo indicatore misura l'abilità del modello di non classificare un'unità come positiva quando è negativa.

- *Recall*, che è il rapporto $TP/(TP+FN)$, dove TP sono i veri positivi (*True Positives*) e FN i falsi negativi (*False Negatives*). Questo indicatore misura l'abilità del modello di classificare correttamente tutti i positivi.
- *f1-score*, che è la media armonica tra i due indici ottenuta come $2 \cdot (Precision \cdot Recall) / (Precision + Recall)$.

I risultati riportati in [Tabella 9](#) sono stati ottenuti tramite un procedimento di validazione denominato *K-fold* che prevede la suddivisione del dataset in 5 sottogruppi e la determinazione dei valori di predizione per ciascun sottogruppo calibrando il modello con i restanti 4 sottogruppi.

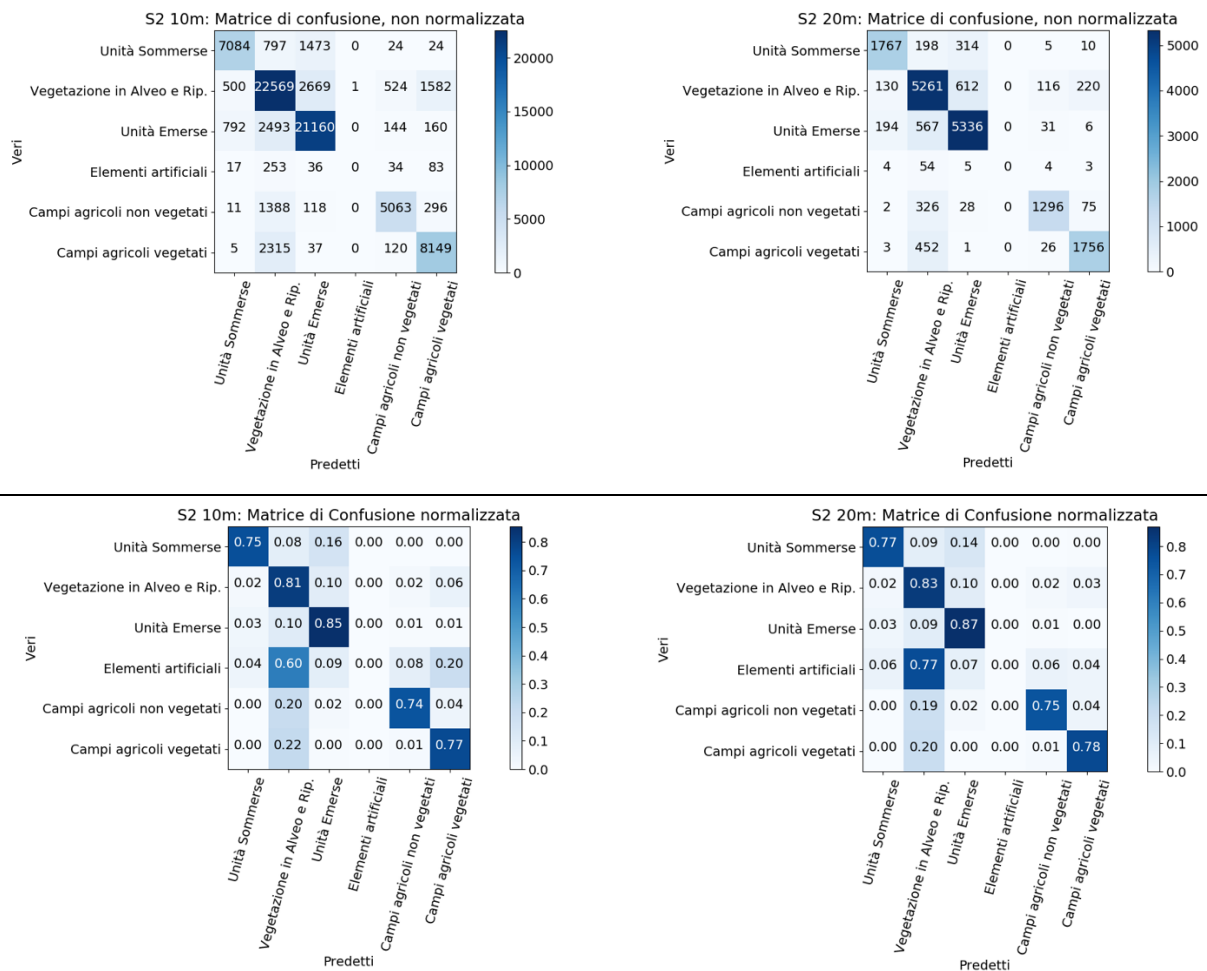


Figura 30 – In alto: matrice di confusione non normalizzata, a sinistra per S2_10m e a destra per S2_20m. In basso: matrice di confusione normalizzata, a sinistra per S2_10m e a destra per S2_20m. La scala di colori è graduata sul numero di pixel classificati.

Tabella 9 – Indicatori *Precision*, *Recall* e *f1-score* e numero di pixel, riportati per ogni unità classificata e come media totale ottenuta per i due modelli S2_10m e S2_20m.

Macro-unità \ S2	10 m				20 m			
	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>f1-score</i>	N. Pixel	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>f1-score</i>	N. Pixel
Unità sommerse	0.84	0.75	0.8	9402	0.84	0.76	0.8	2294
Vegetazione in alveo e ripariale	0.76	0.81	0.78	27845	0.77	0.83	0.79	6339
Unità emerse	0.83	0.85	0.84	24749	0.84	0.87	0.85	6134
Elementi artificiali	0	0	0	423	0.25	0.01	0.03	70
Campi agricoli senza vegetazione	0.86	0.74	0.79	6876	0.88	0.76	0.82	1727
Campi agricoli con vegetazione	0.79	0.77	0.78	10626	0.85	0.78	0.81	2238
Media/Totale	0.8	0.8	0.8	79921	0.82	0.82	0.82	18802

I risultati mostrano una buona capacità del classificatore di distinguere le varie classi. I due modelli hanno precisioni molto simili. Tutte le classi mostrano un'accuratezza intorno o superiore all'80%, in termini sia dell'indicatore *Precision* sia dell'indicatore *Recall*, e una buona coerenza interna al modello per le varie unità classificate, con l'unica eccezione della classe **Elementi artificiali**. Questo è dovuto al fatto che tale classe è quasi assente nel dataset, poiché nelle aree fluviali acquisite con il drone gli elementi antropici e artificiali (case, strade, edifici, protezioni di sponda, etc.) erano rari: solo 423 pixel per S2_10m, meno del 0.01% del totale, si veda la [Tabella 9](#). Queste unità sono state identificate sull'ortofoto a 10 cm e corrispondono soprattutto a strade o altri elementi antropici, come protezioni di sponda, vale a dire elementi che per la maggior parte coprono aree di piccole dimensioni (< 100 m²) e quindi non sempre visibili da S2. Osservando le matrici di confusione in [Figura 30](#) si può vedere che la classe **unità sommerse** (ossia l'acqua) ha degli errori di falsi positivi, in altre parole pixel che pur essendo acqua sono stati classificati come **vegetazione** o **unità emerse**. Questo è probabilmente imputabile a un problema di risoluzione spaziale: nelle zone di confine tra due unità, per esempio al bordo tra **alveo di magra** e **unità emerse** o **vegetazione** un pixel di 10 m x 10 m (o 20 m x 20 m) registra un'informazione spettrale mista tra le due classi e questo aumenta la probabilità di avere errori di classificazione. Lo stesso limite emerge anche per le **unità emerse**, dominate da sedimento, le quali però hanno alcuni errori sia di falsi positivi che falsi negativi con la classe **vegetazione**: molte barre di sedimento infatti possono presentare vegetazione sparsa o in stadi giovanili creando problemi di classificazione tra queste due unità. La **vegetazione** presenta anche errori di falsi positivi classificando alcuni pixel delle classi **campi agricoli vegetati** e **non vegetati** situati sulla pianura come **vegetazione in alveo e ripariale**. Questo errore era atteso dato che la firma spettrale di queste unità è abbastanza simile. Ci si aspettava, tuttavia, che si verificassero errori simili anche tra le **unità sedimento** e **campi agricoli non vegetati**, che invece è risultata meno significativa. Gli errori più significativi sono invece quelli tra le classi di **campo agricolo vegetato** e **non vegetato**, come era prevedibile trattandosi di unità con firma spettrale più o meno simile a seconda della densità e maturità della vegetazione presente. In ogni caso l'identificazione di queste unità dominate da attività antropiche non costituisce l'obiettivo principale della classificazione in oggetto.

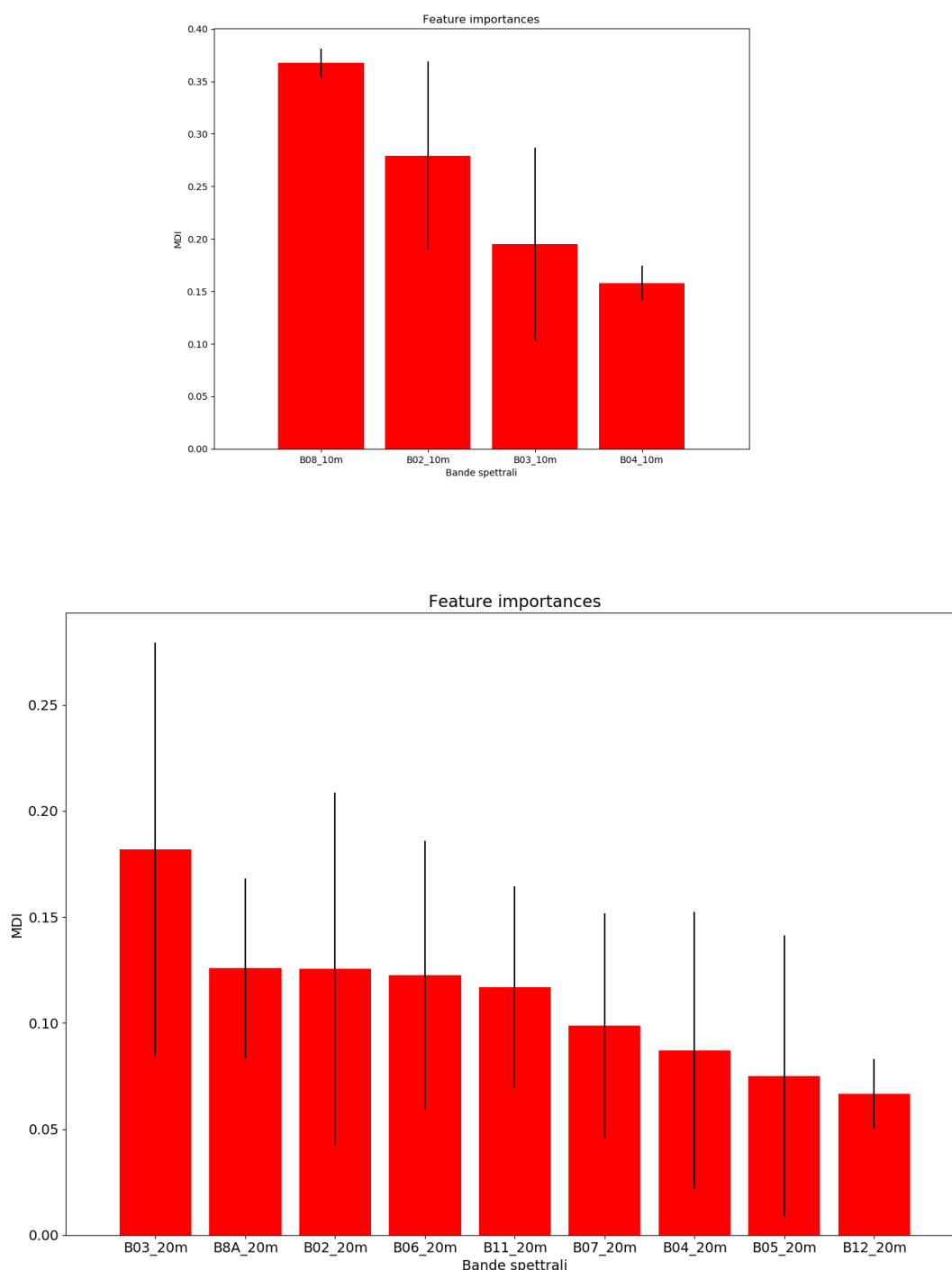


Figura 31 – Importanza relativa delle bande nei due modelli: in alto per S2_10m e in basso per S2_20m.

La [Figura 31](#) riporta l'importanza relativa dei predittori (bande) per i rispettivi modelli. L'indice utilizzato è il *Mean Decrease Impurity* (MDI; Louppe et al. 2013). Il modello ad alberi utilizzato (Random Forest) è un modello non parametrico che crea alberi decisionali utilizzando i predittori a disposizione. Un singolo albero decisionale è composto da diversi "nodi" decisionali, in ognuno di questi un singolo predittore viene utilizzato per restringere le possibili classi di appartenenza di un determinato pixel. Più "nodi" sono utilizzati dallo stesso predittore, più quest'ultimo è importante nel modello. L'MDI calcola per ogni

predittore quanti “nodi” utilizzano tale predittore per compiere una scelta, ed è normalizzato sul numero di campioni che vengono classificati. Più è alto, più la banda è importante nel modello. Dai risultati ottenuti si nota che le bande nell’infrarosso vicino (v. B8 e B8A) sono tra 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) e del verde (B3).

Applicazione: limiti e opportunità

I risultati appena descritti dimostrano che è possibile distinguere con buona precisione (circa l’80% in validazione) **unità sommerse**, **unità emerse** e **vegetazione in alveo** e **ripariale** all’interno del corridoio fluviale utilizzando i dati da S2 e un unico classificatore universale applicabile a scala nazionale.

La [Figura 32](#) riporta per ogni sito i valori di *Precision* e *Recall* ottenuti con il modello S2 a 10 m (risultati pressoché identici si ottengono anche per S2 a 20 m). Queste metriche sono leggermente più alte di quelle riportate in [Figura 30](#) e [Tabella 9](#) poiché riportano i risultati con un classificatore calibrato con tutti i dati di verità a terra disponibili, cioè con tutte le 18 acquisizioni. Una prova della coerenza interna del classificatore è fornita dalla correlazione positiva tra i valori di *Recall* e *Precision*. Le differenze tra i vari siti sono minime e tutte con precisioni superiori all’80%. Questo permette di affermare che il classificatore funziona coerentemente e con alta precisione su tutti i siti oggetto di studio e considerando momenti e condizioni diversi durante l’anno.

I risultati ottenuti dimostrano l’opportunità di creare un classificatore universale di macro-unità SUM da S2. Il confronto mostrato in [Figura 29](#) tra i risultati della classificazione manuale operata sull’immagine raster a 10 cm derivata da dati APR (a sinistra) e quelli risultanti con il classificatore S2_10m (a destra), mette in evidenza la qualità del lavoro prodotto con il classificatore sviluppato. Le due immagini sono pressoché identiche, con solo piccoli errori nelle zone di confine tra unità diverse (ad es., tra **unità sommerse** ed **emerse**, e **vegetazione**, o tra **vegetazione** e **campo agricolo vegetato**). Risultati simili sono stati ottenuti per ogni acquisizione (si veda la sezione [APPENDICE I](#)). Questi errori, che sono stati quantificati nei test condotti in validazione dell’ordine del 15÷20% dei pixel, possono considerarsi strutturali in un simile esercizio di classificazione. Generando la verità a terra con una risoluzione di 10 cm per pixel e lavorando su un classificatore che ha come risoluzione spaziale 10 m o 20 m per pixel è inevitabile che nelle zone di confine tra unità si crei un certo grado di incertezza intrinseca.

L’intento finale di questo lavoro, oggetto di studio del prossimo anno (si vedano i task T3.3, T4.1, T4.3, T5.1 e T5.2), sarà di applicare il classificatore per generare la serie storica degli areali delle diverse unità all’interno del corridoio fluviale, al fine di estrarre gli **indicatori** idromorfologici **4** e **5** ([Tabella 1](#)). A tal fine, nei prossimi mesi saranno condotti alcuni esperimenti per valutare la possibilità di migliorare ulteriormente la precisione del classificatore. Variabili di *image texture* che forniscono una misura di come i pixel sono correlati nei loro intorni, quali l’entropia (Carbonneau et al., 2005; Hedger et al., 2005), saranno testati come predittori aggiuntivi per migliorare la capacità di classificazione, in particolare nelle zone di confine tra classi diverse.

Il modello finale che si intende sviluppare lavorerà ad una scala spaziale di 10 m per pixel proprio per sfruttare al massimo la risoluzione spaziale disponibile: gli esperimenti finora condotti hanno mostrato che non c’è una significativa differenza tra i due modelli S2_10m e S2_20m. Si valuterà l’opportunità di condurre alcuni esperimenti aggiuntivi di ricampionatura a 10 m delle bande dell’infrarosso disponibili solo a 20 m, come la B11 o la B12, al fine di migliorare la precisione del classificatore S2_10m. Si ritiene, comunque, che un errore di classificazione tra il 10% e il 20% sia strutturale e accettabile data la risoluzione spaziale delle S2 e questo grado d’incertezza debba essere preso in considerazione nella successiva interpretazione delle traiettorie temporali dell’areale delle unità morfologiche classificate.

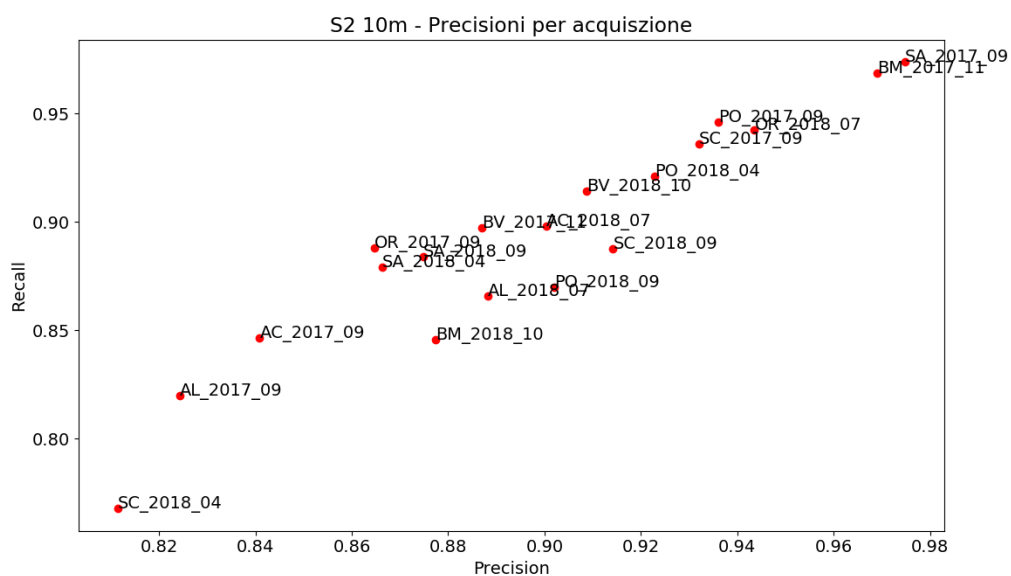


Figura 32 – Grafico di dispersione dei valori di *Precision* e *Recall* per ogni sito ottenuti per il modello S2_10m. Il significato degli acronimi presenti nelle etichette dei punti è riportato in [Tabella 8](#).

STORM: SenTinel-1 (One) River Mapping toolbox

Introduzione

Il toolbox STORM nasce per rispondere agli obiettivi della Task 3.1 (si veda la sezione [Stato di avanzamento delle attività](#) e [Figura 1](#)) e mira a creare un classificatore delle unità sommerse (ossia l'area bagnata) da dati Sentinel-1 (S1). Questo toolbox creerà una base dati di supporto alle attività delle Task 3.2 per la stima delle portate e la Task 3.3 per la delineaazione dell'alveo di piena. Infine, il toolbox potrà essere ulteriormente sviluppato nel seguente anno per supportare l'analisi della dinamica morfologica (**indicatore 5**) tramite dati S1 (es. estrazione dell'intensità di *backscatter* e dei valori di coerenza per diversi intervalli temporali; Task 4.3; si veda sezione [Avanzamento delle attività: step futuri](#)).

Il toolbox STORM è un insieme di sub-routine MATLAB che consente in maniera del tutto automatizzata, a partire dai dati Synthetic Aperture Radar (SAR) Sentinel-1, di generare maschere di aerea bagnata (unità sommerse) geocodificate, ossia proiettate in un sistema di riferimento cartografico, piuttosto che in geometria RADAR (*range*, *azimuth*).

Base fisica del classificatore

Uno degli approcci più tradizionali e immediati per la classificazione dell'acqua nelle immagini SAR è la binarizzazione dell'istogramma applicando una soglia (Henry et al 2006, Matgen et al 2011, Chini et al 2017). Ciò è possibile poiché l'acqua e il suolo, con le dovute eccezioni, generano due meccanismi di *scattering* differenti, descritti statisticamente da due modalità differenti all'interno dell'istogramma. Questo metodo, seppur efficace in diverse situazioni, non si presta all'automazione in quanto la corretta binarizzazione dell'immagine dipende dalla separabilità delle due modalità, ossia dal rapporto acqua/*background* all'interno dell'area in esame. Inoltre, lo *speckle* nei dati *single look*, ovvero non filtrati, aumenta in maniera significativa la varianza delle due distribuzioni a scapito proprio della loro separabilità nell'istogramma dell'immagine.

Anziché utilizzare un algoritmo che dipende dal rapporto acqua/*background* si è optato per l'utilizzo di un algoritmo che dipende da un vincolo più morbido (l'acqua non deve rappresentare il *background* dell'immagine) ed è anche meglio predisposto all'automazione. L'algoritmo classifica l'immagine sfruttando le distribuzioni spazio-radiometriche, rispetto al solo istogramma globale dell'immagine, permettendo di identificare in maniera più accurata corpi omogenei (target distribuiti) quali i fiumi.

Filtraggio

A prescindere da quale metodo venga utilizzato per la classificazione, è comunque da considerarsi una fase di filtraggio dell'immagine, questo perché la potenza dello *speckle* nell'immagine *single look* è spesso eccessiva e può sovrastare il contenuto informativo dell'immagine in maniera tale da non rendere classificabili i target distribuiti.

Per ottenere un abbassamento della potenza dello *speckle* è necessario mediare un certo numero di campioni statisticamente indipendenti, identicamente distribuiti (i.e., pixel appartenenti allo stesso target distribuito). Così facendo, si ottiene una riduzione della potenza di \sqrt{n} volte, dove n indica il numero di campioni mediati. A causa della risoluzione spaziale limitata dei dati in input (20×5 m), non è possibile adottare una strategia di filtraggio che vada a considerare i soli pixel omogenei nello spazio, ma è necessario estenderla anche nel tempo, considerando le osservazioni precedenti e successive a quella d'interesse.

È stata quindi scelta una finestra di convoluzione tridimensionale $1 \times 5 \times 3$ rispettivamente nelle dimensioni di azimuth, *range* e tempo. Al pixel centrale della finestra di convoluzione viene assegnato il valore mediano della distribuzione costruita dai pixel coinvolti nell'operazione di convoluzione.

Le dimensioni della parte spaziale della finestra di convoluzione sono di 1 x 5 in maniera tale da sfruttare la risoluzione anisotropa dei dati, aggregando un certo numero di campioni senza intaccare ulteriormente la risoluzione in azimuth, già di soli 20 m; inoltre, considerare più di un pixel in azimuth farebbe sì che venga facilmente violato il vincolo di omogeneità. La scelta, invece, di estendere la finestra di convoluzione per tre osservazioni, consente di compensare alla scarsità di campioni considerati nello spazio, per arrivare a una riduzione della potenza dello *speckle* di quasi quattro volte, con un rischio minore di mancare alla condizione di omogeneità dei pixel ([Figura 33](#)).

La scelta di utilizzare il filtro mediano su una finestra di convoluzione come quella sopra descritta è sostenuta da due considerazioni:

- la mediana è uno stimatore più robusto rispetto alla media;
- assumendo che le fasi transitorie non siano impulsive, ma piuttosto a scalino, ovvero che il nuovo stato sia costante per almeno 6 gg (tempo di rivisita della costellazione S1), su tre osservazioni solamente una sarà non omogenea con un effetto trascurabile sulla stima della mediana.

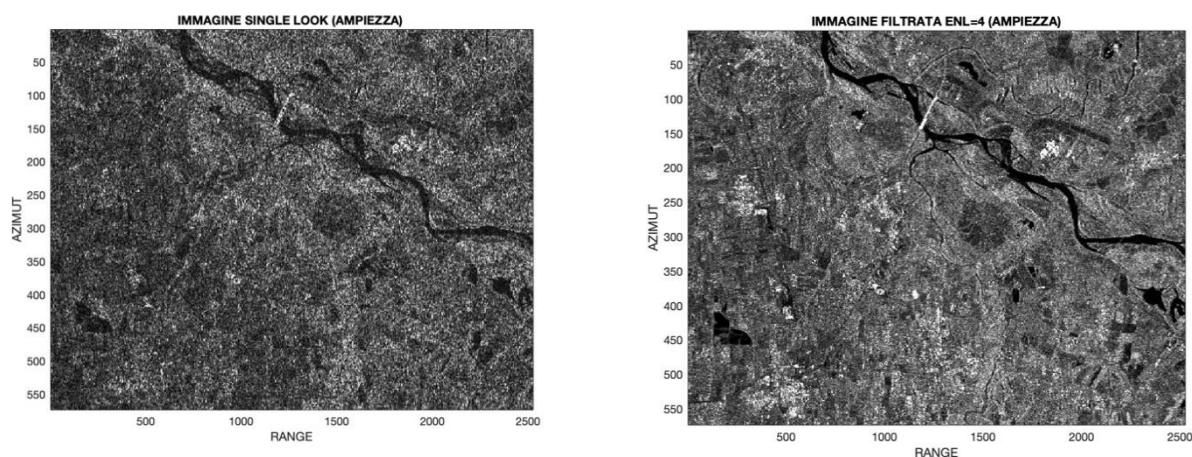


Figura 33 – Confronto tra un'immagine non filtrata (sx) e una filtrata (dx).

Algoritmo per la classificazione dell'area bagnata

In questa sezione viene presentato l'algoritmo che consente di segmentare l'acqua all'interno della scena. Ciò si ottiene in maniera del tutto indipendente dal rapporto acqua/non acqua, pertanto il funzionamento dell'algoritmo non è limitato da nessun vincolo, a meno che l'acqua non rappresenti il *background* dell'immagine. Nel dettaglio, l'algoritmo opera una trasformazione locale e selettiva dell'immagine che aumenta significativamente il contrasto acqua/*background*, permettendo quindi la binarizzazione senza alcun *bias* dell'immagine trasformata, tramite soglia.

Ciò è possibile sfruttando due aspetti, uno fisico-statistico e l'altro morfologico, che caratterizzano le scene SAR in cui è presente l'acqua:

- I. lo *speckle* è un processo moltiplicativo rispetto all'ampiezza, ossia ampiezza/intensità maggiore producono uno *speckle* più potente. Questo fa sì che la distribuzione di probabilità che descrive un target distribuito a bassa ampiezza, abbia minore varianza (potenza). Se si considera come approssimazione di tale distribuzione una Gaussiana (come è vero per delle ampiezze filtrate a mediana), si avrà una probabilità massima della distribuzione maggiore, come illustrato in [Figura 34](#);

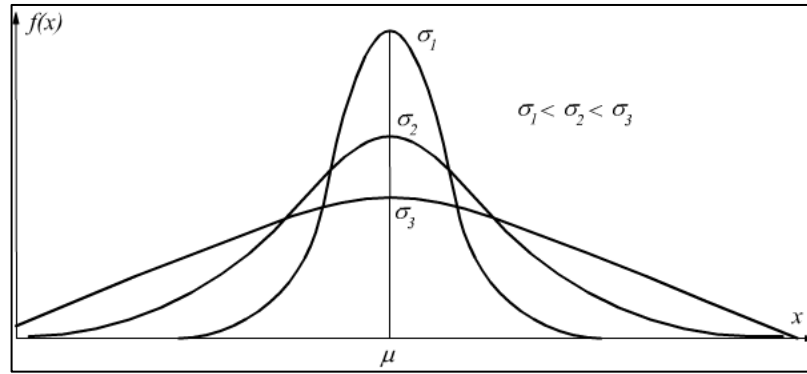


Figura 34 – Influenza della varianza sulla forma della distribuzione gaussiana.

- II. quanto descritto al punto I è esaltato dalla natura morfologica degli specchi d'acqua (fiumi, laghi, aree inondate, etc.), in quanto oggetti fortemente omogenei: osservando la distribuzione dei pixel compresi nel vicinato di altri pixel contenuti in un determinato intervallo radiometrico, questo, esclusivamente per la natura morfologica dell'immagine, avrà una varianza minore (maggiore omogeneità) se tale intervallo è compreso nel *range* dei valori caratterizzanti i corpi d'acqua nella scena.

Viste queste premesse e noto che, a causa del meccanismo di *scattering* “single bounce”, l'acqua nelle scene SAR produce un valore di ampiezza molto basso, è possibile combinare i due effetti per segmentare le aree bagnate della scena in esame.

In particolare, l'algoritmo si sviluppa su sette punti distinti, che vengono applicati separatamente per la polarizzazione VV e VH:

- Saturazione dell'estremo superiore del *Dynamic Range* (DR): ciò è necessario poiché a causa di altri particolari meccanismi di *scattering*, come il “double bounce” tipico dei riflettori diedrici e triedrici (i.e. edifici e strutture verticali), si hanno dei valori di ampiezza estremamente alti che desaturano la scena, compromettendo la corretta esecuzione del punto successivo.
- Divisione del DR in intervalli: individuato il DR saturato dell'immagine, questo viene diviso in N intervalli in base alla sensibilità imposta (percentuale del DR). Gli intervalli contenenti un numero non significativo di pixel (< 10) vengono esclusi; non saturando la scena, come al punto a), si avrebbero moltissimi intervalli non significativi.
- Costruzione delle distribuzioni locali: per ogni intervallo viene stimata la relativa distribuzione di probabilità gaussiana, osservando media e varianza della popolazione costituita dal vicinato 3×3 (eliminando le possibili sovrapposizioni) di tutti i pixel compresi nell'intervallo in esame. Al termine di questo punto si hanno N distribuzioni del tipo riportato in [Equazione 1](#) e rappresentate in [Figura 35](#)).

$$G_i(\mu_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}.$$

(Equazione 1)

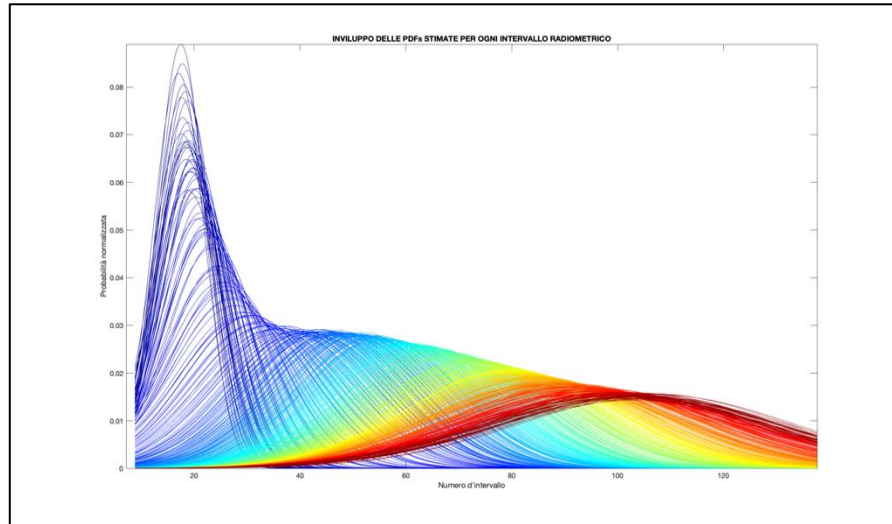


Figura 35 – Inviluppo delle gaussiane G_i stimate per tutti gli intervalli del DR-Dynamic Range.

- d) Valutazione delle distribuzioni: le N funzioni G_i vengono valutate sull'immagine di ampiezza (I_A), generando uno *stack* $S_{m,n,z}$ composto dalle N $G_i(I_A)$.
- e) Costruzione immagine delle massime probabilità: attraverso l'operazione riportata in [Equazione 2](#) si ottiene l'immagine di massima probabilità. Per le ragioni indicate nei punti I e II di questa sezione si ottiene uno spianamento del *background* e un aumento del contrasto acqua-*background*, come evidenziato dalla scala cromatica scelta in [Figura 36](#).

$$(I_{max})_{i,j} = \max_{i \in N} G(x_{(i,j)}, \mu_i, \sigma_i)$$

(Equazione 2)

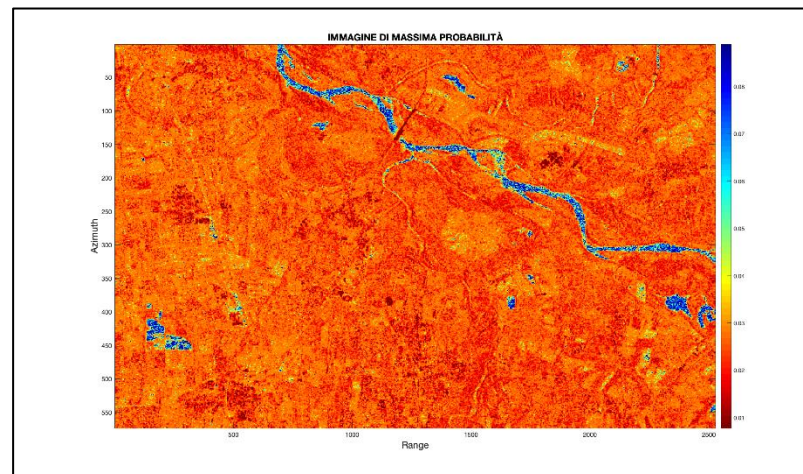


Figura 36 – Immagine delle massime probabilità.

- f) Binarizzazione dell'immagine delle massime probabilità: infine è possibile binarizzare l'immagine, applicando una soglia all'istogramma. La binarizzazione senza *bias* è possibile poiché la combinazione dei due effetti condensa il *background* nel picco, mostrato nella [Figura 37](#). Tale binarizzazione non dipende dal rapporto acqua/*background* (posizione del picco), ma dalla sola presenza di un *background* (picco)

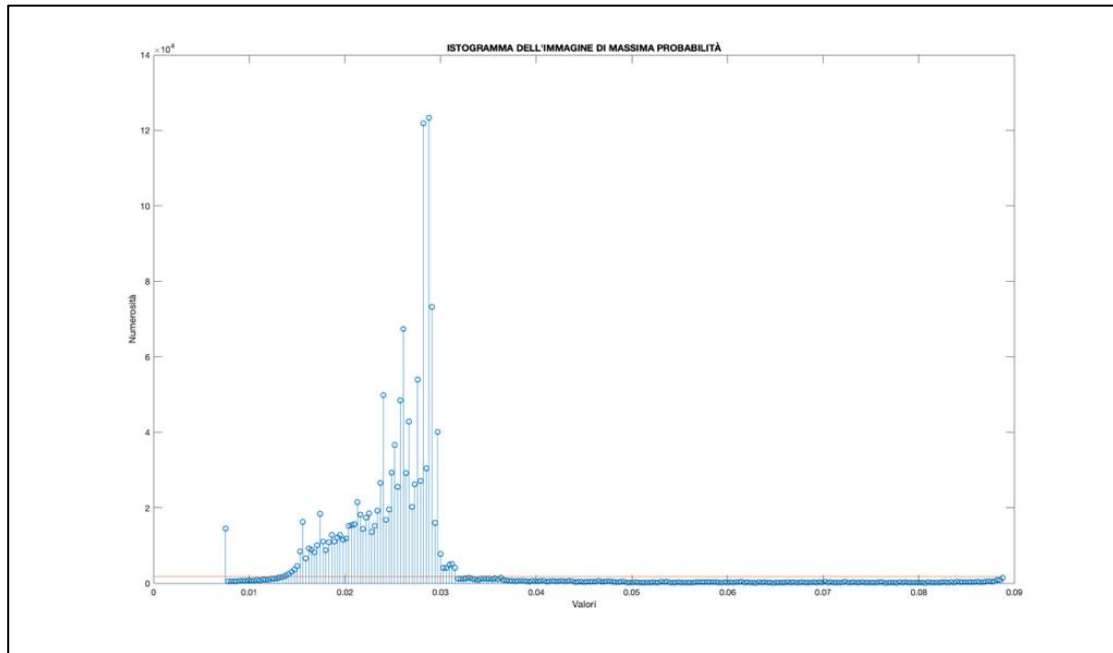


Figura 37 – Istogramma dell'immagine di massima probabilità.

- g) Infine, è applicato un filtro euristico, cioè non derivato in maniera analitica, ma attraverso l'implementazione logica dedotta secondo delle ipotesi. I pixel preselezionati dalla binarizzazione di cui al punto f) rispettivamente per la polarizzazione VV e VH, vengono combinati attraverso una somma, ottenendo quindi una sola maschera con tre valori:
- 2 per i pixel che sono stati classificati come acqua sia in polarizzazione VV che VH, 1 per i pixel che sono stati classificati come acqua in una delle due polarizzazioni (rappresentati in rosso per il VV e in verde per il VH in [Figura 38](#)) e 0 per quelli classificati non acqua sia in polarizzazione VV che VH.
 - I pixel classificati positivamente in entrambe le polarizzazioni sono accettati direttamente a meno che non siano punti isolati, in questo caso vengono esclusi.
 - I pixel classificati positivamente in una sola polarizzazione sono accettati solamente se sono adiacenti a un pixel classificato positivamente in entrambe le classificazioni.

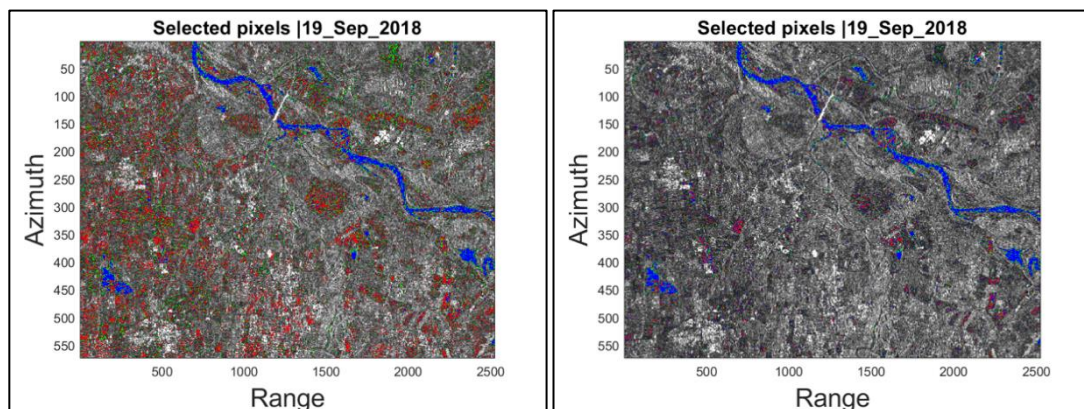


Figura 38 – Pre-classificazione non filtrata (sx) e classificazione finale (filtrata)(dx). In blu i punti classificati positivamente in entrambe le polarizzazioni, in rosso solo per la VV e in verde per la VH.

Presentazione del toolbox

Il toolbox STORM è composto da una serie di varie sub-routine, responsabili delle task di pre-processing, classificazione e post-processing. Tali routine sono eseguite nel corretto ordine da una routine principale (denominata *wrapper*); alcune di queste funzioni a loro volta sfruttano gli algoritmi del *Sentinel-1 Toolbox* messi a disposizione da ESA, attraverso il *GPT-graph processing tool*.

Il toolbox è costituito dalle seguenti routine/sub-routine MATLAB, archiviate nell'annesso digitale secondo il percorso *IRIS_repository\STORM\codici*:

- **STORM.m**, routine principale responsabile dell'esecuzione in serie delle sub-routine;
- **autoconfiguration.m**, sub-routine che configura in maniera automatica i parametri necessari per il funzionamento del toolbox;
- **coreg.m**, sub-routine che effettua tutti gli step di pre-processing necessari per rendere i dati IW-SLC processabili, sfruttando il *Sentinel-1 Toolbox*;
- **wm.m**, sub-routine che gestisce i dati in ingresso prima di passarli al classificatore;
- **wm_processor.m**, sub-routine che esegue l'algoritmo di classificazione;
- **geocoding.m**, sub-routine che riproietta i dati da coordinate RADAR a coordinate geografiche/cartografiche.

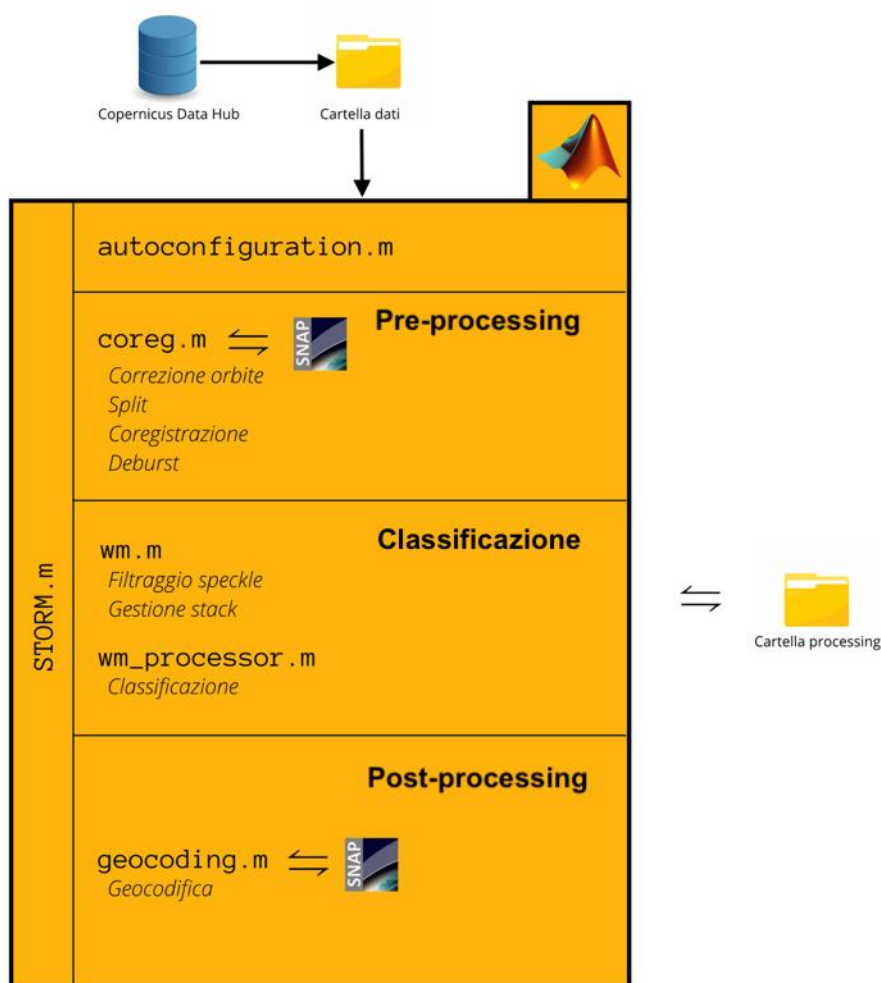


Figura 39 – Schema operativo di STORM.

STORM copre l'intera catena di lavoro necessaria per ottenere dal dato satellitare di Sentinel-1 una maschera di area bagnata (unità sommerse) geocodificata del/i tratto/i fluviale/i in esame in una determinata finestra temporale. Tale catena operativa è composta di numerosi step a causa della complessità dei dati SAR e ancor più di quelli acquisiti in modalità *Interferometric Wideswath* (IW) da Sentinel-1, usando il sistema *Terrain Observation by Progressive Scans* (TOPS; De Zan et al, 2006). A valle del processo di input, si individuano, come illustrato nel dettaglio in [Figura 39](#), le seguenti fasi operative: pre-processing; classificazione; e post-processing.

Dati di Input

In generale i dati SAR vengono distribuiti come *Single Look Complex* (SLC), ossia dati nel dominio dei numeri complessi ("*Complex*") e non filtrati ("*Single Look*"). Aumentare il numero di *look*, che equivale a sotto campionare e mediare l'immagine, consente di abbattere l'errore dovuto al fenomeno dello "*speckle*" (*speckle noise*) a scapito della risoluzione spaziale. Lo *speckle* è un processo statistico causato dalla geometria degli scatterer elementari all'interno della cella di risoluzione, che si manifesta nelle immagini di ampiezza o intensità in maniera molto simile al classico rumore "*sale e pepe*". Una singola acquisizione di S1 contiene l'osservazione stessa in due polarizzazioni differenti, ognuna delle quali a sua volta composta da una banda contenente la parte reale del dato (*I*) e un'altra contenente la parte complessa (*Q*). Combinando algebricamente la banda reale con quella complessa è possibile costruire un'immagine di ampiezza (I_A) nel dominio dei numeri reali, come indicato nella formula seguente:

$$I_A = |I + jQ|, \quad \text{(Equazione 3)}$$

dove *j* è l'unità immaginaria. Pertanto, l'algoritmo opera nel dominio reale su immagini di ampiezza.

Come anticipato, STORM è stato sviluppato per processare i dati *IW* (Sentinel online, 2019) di Sentinel-1 acquisiti in TOPS. A causa del funzionamento dell'antenna montata a bordo del satellite, questi dati sono caratterizzati da ulteriori particolarità nella loro organizzazione. L'intera scena ha una dimensione di 250 x 250 km, suddivisa orizzontalmente in tre tile indipendenti detti "*Subswath*", ognuno composto a sua volta verticalmente da nove tile non indipendenti detti "*Burst*". I tre *Subswath* possono essere semplicemente considerati come tre acquisizioni indipendenti, mentre i *Burst* prima di poter essere processati devono essere sincronizzati (deburstati).

Autoconfigurazione

L'autoconfiguratore, insieme al *wrapper*, (*autoconfiguration.m*) permette di ridurre a zero l'interazione con l'utente e di eseguire il toolbox in maniera del tutto automatica, con la possibilità di lanciare più sessioni in serie o in parallelo. Più dettagliatamente, l'autoconfiguratore legge le impostazioni nel file *settings.txt* di cui al punto II della sezione [Esecuzione del toolbox](#) e accede alla cartella ivi indicata, contenente i file da processare, come specificato al punto I della medesima sezione. Quando viene eseguito l'autoconfiguratore vengono generati i seguenti prodotti intermedi (*by-products*):

- *list.txt*, file contenente la lista dei file presenti nella cartella di input;
- *settings_sessione_esempio_dd_mm_yy_dd_mm_yy.mat*, file di MATLAB contenente la configurazione generata automaticamente dalla routine.

Pre-processing

La fase di pre-processing è controllata dalla routine *coreg.m*. In questa fase, i dati di input SLC sono corretti geometricamente attraverso l'applicazione delle orbite precise. Le orbite precise sono disponibili da 20 gg dopo la data di acquisizione. In assenza delle orbite precise, questa operazione viene effettuata utilizzando le orbite restituite.

Successivamente, qualora venga indicata un'area di interesse (AOI), i dati vengono “splittati”, ossia privati dei *burst* che non intersecano suddetta area, o altrimenti processati interamente e coregistrati, allineando tutti gli *SLC* (*slave*) al primo in ordine temporale (*master*). Infine, ogni *SLC* è oggetto dell'operazione di *debursting*, consistente nella sincronizzazione dei singoli *burst*, che possono poi essere uniti a formare la singola immagine. In questo tipo di applicazione la scelta dell'immagine master e l'utilizzo o meno delle orbite precise, sebbene non sia stato verificato quantitativamente, non influenzano i risultati, poiché le differenze di fase non sono utilizzate dall'algoritmo.

Al termine della fase di pre-processing, si ottiene uno stack di immagini SAR su cui è possibile operare *pixelwise*, ossia un pixel per volta, nello spazio e nel tempo. Più precisamente, lo *stack* sarà composto da $4n$ bande, dove n è il numero di *SLC* in input, ossia, per la singola acquisizione, una banda reale e complessa per le polarizzazioni VV e VH. Quando è eseguita la routine *coreg.m*, sono generati i seguenti *by-product*:

- *Sessione_esempio_dd_MM_yyyy_dd_MM_yyyy.dim* e *Sessione_esempio_dd_MM_yyyy_dd_MM_yyyy.data*, rispettivamente file *header* (in formato ESA *.dim*) e contenuto dello stack di dati, necessari per la successiva fase di geocodifica;
- *Sessione_esempio_dd_MM_yyyy_dd_MM_yyyy.tif*, file dello *stack* di dati, in formato *.tif*, necessario successivamente per il processamento in MATLAB delle bande;
- *Sessione_esempio_dd_MM_yyyy_dd_MM_yyyy.tfw*, file *.tfw* dello *stack* di dati, necessario per georiferire il file *.tif* e gestirlo all'interno di MATLAB come *GeoTIFF*;
- *coreg.xml*, grafo *.xml* contenente le istruzioni per il pre-processing che MATLAB assegna a SNAP;
- *rename.xml*, grafo *.xml* contenente l'istruzione per la rinomina del file *.dim*;

Classificazione

La fase di classificazione è gestita dalla routine *wm.m*, contenente il *wm_processor.m*. La prima è responsabile della gestione del file *.tif* da cui le bande sono lette e utilizzate per creare due *stack* multi-temporali di immagini di ampiezza per le polarizzazioni VV e VH applicando l'[Equazione 1](#), inoltre effettua il filtraggio spazio-temporale per entrambi gli *stack*, rendendoli pronti per la classificazione. A questo punto, le singole acquisizioni sono estratte a una a una dallo *stack* e passate al classificatore (*wm_processor.m*) che processa separatamente la polarizzazione VV e quella VH, producendo due output distinti per la stessa acquisizione. La classificazione VV e quella VH dell'acquisizione processata sono prese in carico nuovamente da *wm.m* che applica il filtro euristico, di cui al punto g) della sezione [Algoritmo per la classificazione dell'area bagnata](#), alla combinazione delle due classificazioni per produrre quella finale. Eseguita la routine *wm.m* vengono generati i seguenti *by product*:

- *# n - 2 Selected_pixels_dd_MM_yyyy.png* immagini d'ampiezza con sovrapposti i punti selezionati dal classificatore, in geometria radar, come in [Figura 40](#). Questo prodotto è generato solamente per finalità di controllo.

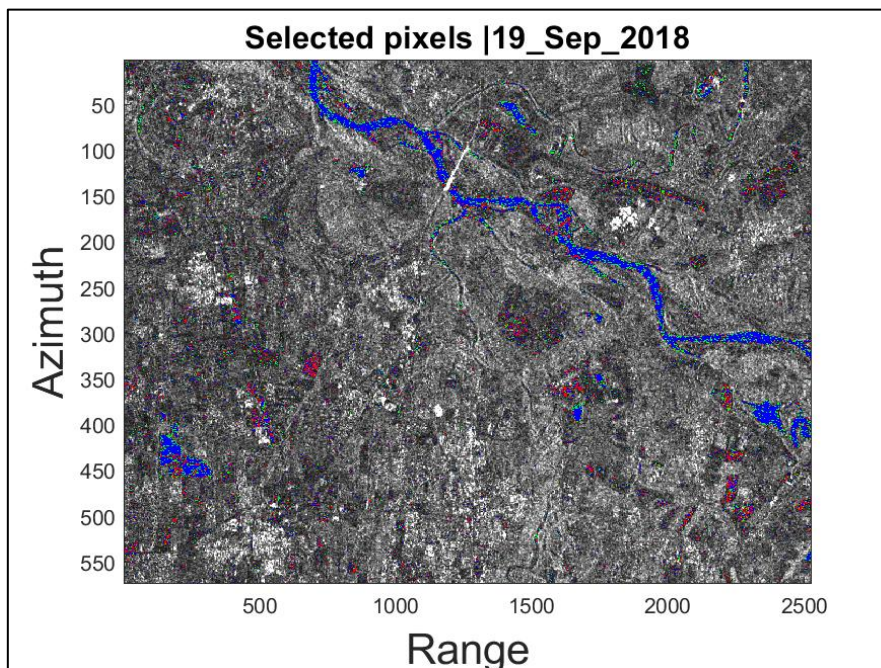


Figura 40 – Immagine di ampiezza con punti classificati: Blu (VV, VH), Verde (VV) e Rosso (VH).

Post-processing

Il post-processing, che in questo contesto consiste della sola geocodifica, è gestito dalla funzione *coreg.m*. Questa routine riceve da *wm.m* le classificazioni relative alle acquisizioni in input e trasforma la maschera binaria di classificazione da coordinate RADAR (range,azimuth) a quelle WGS 84 geografiche o UTM/WGS84 cartografiche con selezione automatica della zona. Questa opzione può essere controllata solamente con una modifica interna del codice. A questo punto il programma termina le sue task producendo le maschere geocodificate. Al completamento di questa fase, si hanno i seguenti *by-product*:

- # n – 2 *final_mask_Sessione_esempio_dd_MM_yyyy.tif* maschere non geocodificate in formato *.tif* necessarie per la procedura di geocodifica;

e i prodotti finali (come mostra un esempio in [Figura 41](#)):

- # n – 2 *final_mask_Sessione_esempio_dd_MM_yyyy_TC.tif*.

Al termine delle operazioni, nella cartella della sessione si avranno file analoghi a quelli mostrati come esempio nella [Figura 42](#).

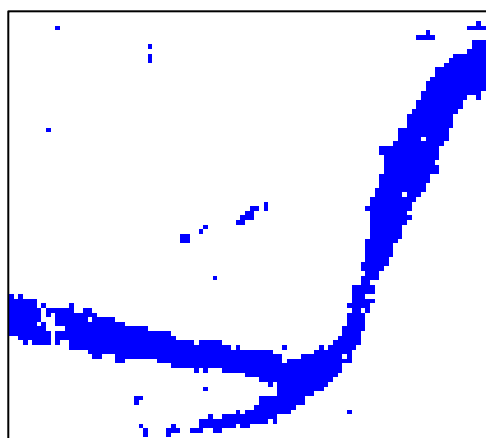


Figura 41 - Esempio di maschera finale geocodificata.

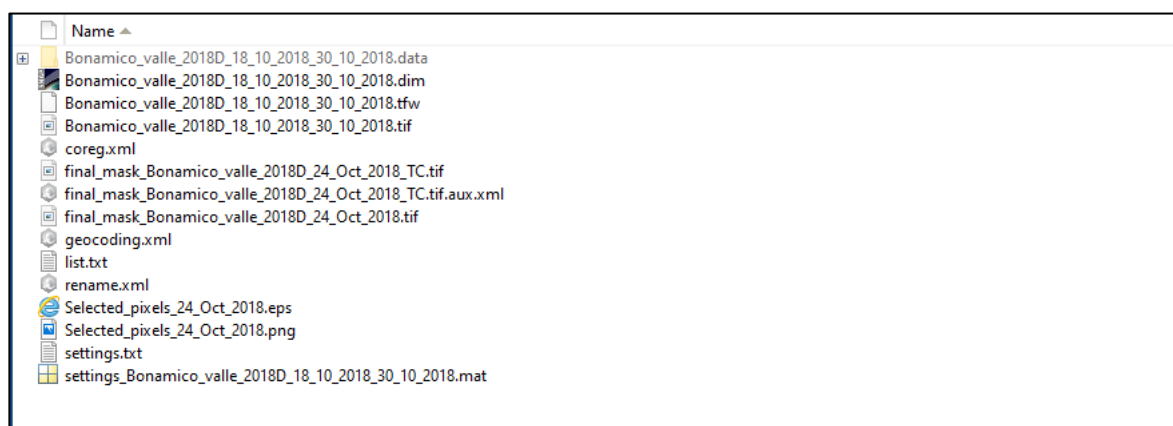


Figura 42 – Contenuto della cartella di sessione al termine del processing di tre osservazioni.

Configurazione ed esecuzione del Toolbox

Installazione e Dipendenze

Per il corretto funzionamento di *STORM* è necessaria l'installazione della libreria geospaziale *GDAL* e del *Sentinel-1 Toolbox*, che è contenuto in *SNAP*, ovvero la piattaforma GIS sviluppata da ESA che permette di pre-processare e gestire i dati geospaziali acquisiti dai satelliti del programma Copernicus. In particolare, sarà necessario aggiungere alla variabile d'ambiente '*PATH*' del sistema operativo in cui si intende utilizzare *STORM* i percorsi alla libreria *GDAL* di cui sopra e alla cartella di installazione di *SNAP*. Soddisfatte queste dipendenze sarà sufficiente aggiungere tra i percorsi di *MATLAB* quello alla cartella contenente le routine (*IRIS_repository\STORM\codici*). A questo punto *STORM* sarà operativo e funzionante.

Esecuzione del toolbox

STORM è concepito per un funzionamento completamente automatizzato, in maniera tale da non richiedere l'intervento di un operatore successivamente all'avvio. Per l'efficace esecuzione del toolbox è però necessario rispettare i seguenti passi:

- I. Creare una cartella contenente esclusivamente i dati *IW-SLC* che si intende processare. Il toolbox non prevede restrizioni sul nome della cartella;
- II. Creare una seconda cartella, sempre senza restrizioni di nome, per la sessione in corso e crearvi il file di configurazione, il cui nome dovrà, invece, essere necessariamente "*settings*" con estensione .txt e formato testo normale (*plain text*), compilandolo secondo le indicazioni di cui al punto successivo. In questa cartella saranno generati e archiviati i file intermedi e gli output.

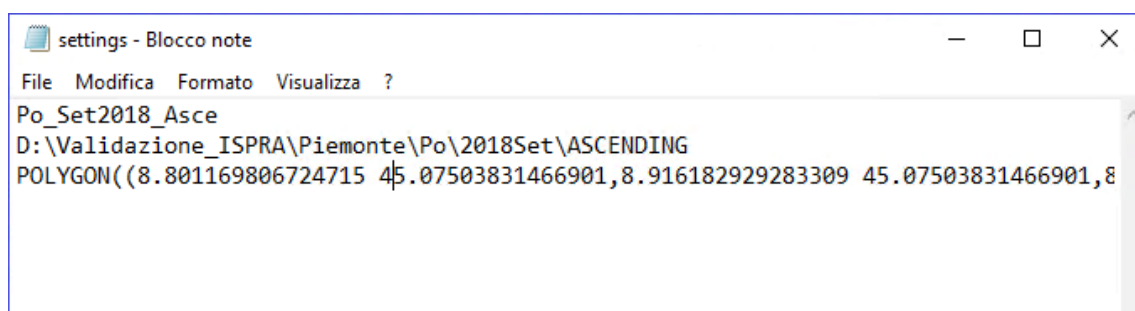
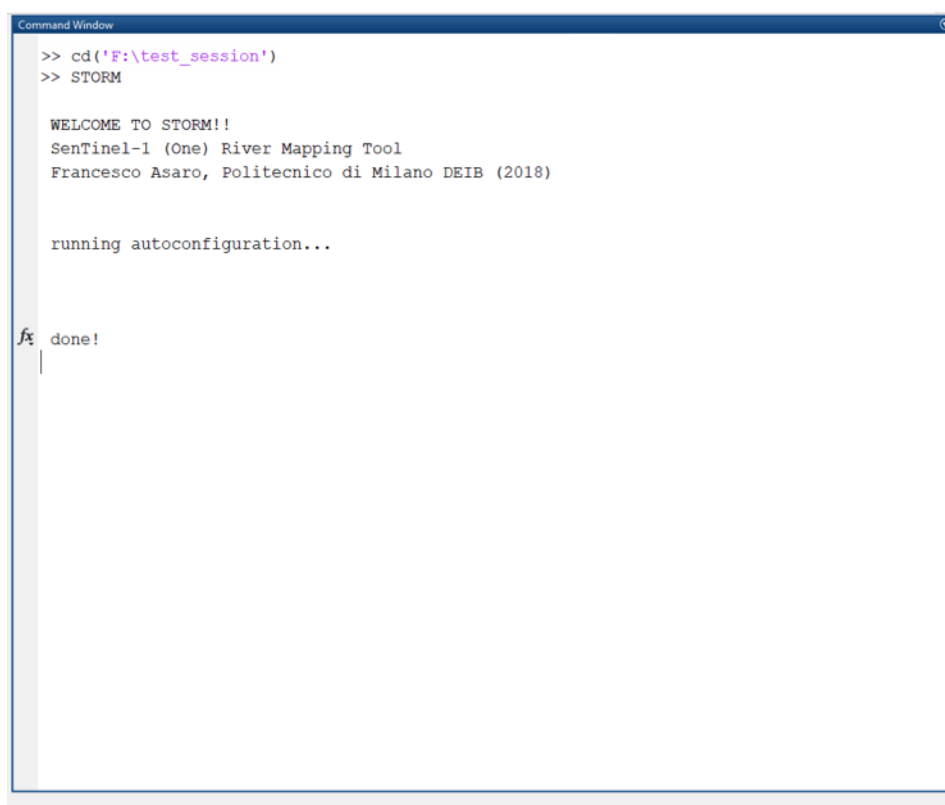


Figura 43 – Esempio del file di configurazione.

- III. Il file di configurazione è composto da tre righe (si veda [Figura 43](#)). La prima riga è quella in cui è impostato il nome assegnato alla sessione, che sarà poi utilizzato per generare i nomi dei file intermedi e degli output. La seconda riga deve contenere il percorso della cartella in cui sono presenti i file da processare, di cui al punto I. Infine, nella terza riga (facoltativa) può essere utilizzata per indicare l'estensione di un'area di interesse in formato poligono WKT-*Well Known Text*. Se questa riga viene omessa (ossia l'area di interesse non viene indicata), allora i dati saranno processati interamente.
- IV. A questo punto, aperto MATLAB e posizionatisi nella cartella creata al punto II, basterà invocare la routine principale “*STORM.m*” per processare i dati (si veda [Figura 44](#)). I file intermedi e gli output sono generati e archiviati nella cartella di cui al punto II.



```
>> cd('F:\test_session')
>> STORM

WELCOME TO STORM!!
Sentinel-1 (One) River Mapping Tool
Francesco Asaro, Politecnico di Milano DEIB (2018)

running autoconfiguration...

fx done!
```

Figura 44 – Esempio della sessione del toolbox STORM.

Validazione

La validazione dell'algoritmo è stata effettuata su tutti i siti di studio descritti nella sezione [Creazione del dataset per la verità a terra \(Task 1\)](#), confrontando la classificazione secondo fotointerpretazione delle immagini acquisite da APR (si veda la sezione

[Classificazione macro-unità da ortofoto drone \(T1.2\)](#)) con le maschere estratte dall'algoritmo qui presentato a partire dalla più vicina acquisizione di Sentinel-1, riportata in [Tabella 10](#).

Tabella 10 – Date di acquisizione APR e S1.

Acronimo	Sito	Data acquisizione APR	Data acquisizione S1
SA_2017_09	Sesia Arborio	17/09/2017	18/09/2017
SC_2017_07	Sesia Caresana	19/07/2017	19/07/2017
PO_2017_09	Po	16/09/2017	14/09/2017
AC_2017_09	Acquapendente	20/09/2017	20/09/2017
AL_2017_09	Allerona	18/09/2017	20/09/2017
OR_2017_09	Orvieto	19/09/2017	20/09/2017
BM_2017_11	Bonamico monte	15/11/2017	15/11/2017
BV_2017_11	Bonamico valle	16/11/2017	15/11/2017
SA_2018_04	Sesia Arborio	18/04/2018	18/04/2018
SC_2018_04	Sesia Caresana	16/04/2018	18/04/2018
AC_2018_07	Acquapendente	17/07/2018	17/07/2018
AL_2018_07	Allerona	16/07/2018	17/07/2018
OR_2018_07	Orvieto	17/07/2018	17/07/2018
SA_2018_09	Sesia Arborio	21/09/2018	21/09/2018
SC_2018_09	Sesia Caresana	22/09/2018	21/09/2018
PO_2018_09	Po	20/09/2018	19/09/2018
BM_2018_10	Bonamico monte	24/10/2018	24/10/2018
BV_2018_10	Bonamico valle	23/10/2018	23/10/2018

Data la grande differenza in termini di risoluzione spaziale tra la maschera ottenuta attraverso fotointerpretazione delle immagini APR (10 cm) e quella ottenuta utilizzando STORM sui dati S1 (20 m), è parso opportuno sotto campionare la prima maschera su una griglia della stessa risoluzione della seconda. In particolare, trattandosi di una classificazione, si è scelto di utilizzare la moda come metodo di interpolazione sulla nuova griglia. A questo punto con entrambi i prodotti alla stessa risoluzione è stato possibile operare un confronto pixel-pixel e quindi misurare la performance dell'algoritmo utilizzando la classica matrice di confusione binaria e le relative metriche. In particolare, si è scelto di utilizzare l'accuratezza globale come misura appunto per la performance globale dell'algoritmo, ossia della corretta classificazione di acqua e resto della scena, definita dalla seguente formula:

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN},$$

(Equazione 4)

dove TP, TN, FP e FN stanno a indicare i veri positivi (*True Positive*), veri negativi (*True Negative*), falsi positivi (*False Positive*) e falsi negativi (*False Negative*), rappresentati rispettivamente di colore blu, marrone scuro, celeste e marrone chiaro in [Figura 45](#). Inoltre, l'indicatore *f-1 score* è stato scelto per rappresentare la performance dell'algoritmo nel classificare correttamente la sola classe acqua, definito come segue:

$$f1\text{-score} = \frac{2*TP}{2*TP+FP+FN}. \quad \text{(Equazione 5)}$$

In [Figura 45](#) è illustrato il risultato della validazione, operata *pixelwise* così come descritto all'inizio della sezione. La codifica dei colori scelta è collegata al risultato di validazione ottenuto sul pixel.

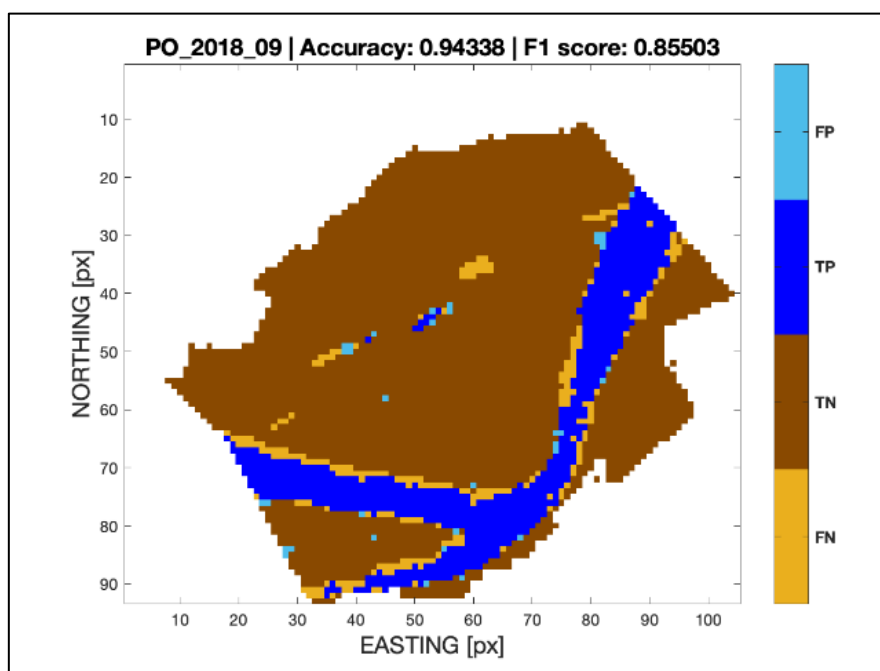


Figura 45 – Validazione ottenuta sul Po per l'acquisizione di settembre 2018 (PO_2018_09).

Nella tabella che segue sono riportati i risultati di validazione, per le metriche scelte, su tutti i siti indicati in [Tabella 11](#), a meno delle acquisizioni in cui non era presente acqua.

I file di validazione sono contenuti nella directory *IRIS_Repository\STORM\STORM_processing* in cartelle nominate con lo stesso acronimo del sito esaminato.

Tabella 11 – Risultati di validazione per ogni acquisizione in termini di accuratezza globale e F1-Score.

ACQUISIZIONI	ACCURATEZZA GLOBALE	F1-SCORE	LARGHEZZA MAX. NEL TRATTO IN ESAME
AC_2017_09	0.750	0.111	26
AC_2018_07	0.663	0.075	27
AL_2017_09	0.868	0.352	43
AL_2018_07	0.921	0.417	33
BM_2018_10	0.943	0.033	5
BV_2017_11	0.784	0.013	5
BV_2018_10	0.902	0.174	5
OR_2017_09	0.933	0.556	36
OR_2018_07	0.956	0.520	32
PO_2017_09	0.941	0.814	120
PO_2018_09	0.943	0.855	190
SA_2018_04	0.869	0.561	80
SA_2018_09	0.897	0.292	80
SC_2017_07	0.888	0.667	60
SC_2018_04	0.920	0.773	50
SC_2018_09	0.887	0.702	50

Da una prima analisi è evidente una certa correlazione tra la performance misurata dell'algoritmo e la larghezza del fiume in esame, nonché una forte asimmetria tra accuratezza globale e *f1-score*, questi aspetti verranno approfonditi nella sezione successiva.

Osservando tutte le figure riportate nell'[APPENDICE I](#) per ogni acquisizione è inoltre possibile individuare in alcune occasioni (e.g. AC_2018_07, BV_2017_11) una preponderanza di falsi positivi generati per lo più sulle aree agricole, questa tipologia di errore sarà analizzata nel capitolo successivo ed è ascrivibile alla saturazione del suolo.

Discussione

Limiti generali

Guardando attentamente i risultati ottenuti in fase di validazione appare in maniera abbastanza evidente la dipendenza di questi dalla larghezza del corso d'acqua esaminato, come mostrato in [Tabella 11](#). Ovviamente, essendo la risoluzione di partenza del dato di soli 20 m, le performance di classificazione sono molto ridotte per fiumi la cui larghezza massima non va oltre la frazione di pixel, come ad esempio è stato per la fiumara Bonamico e il Paglia ad Acquapendente nel momento delle acquisizioni.

Le performance migliorano nettamente per fiumi la cui larghezza dell'area bagnata media è di circa due pixel, come ad esempio il Paglia a Orvieto, la cui validazione è mostrata nella [Figura 46](#), ma dove il numero dei FP è comunque significativo e non permette di generare una maschera continua dell'area

bagnata. Risultati più soddisfacenti sono stati invece raggiunti per i tratti che hanno un'area bagnata di almeno 60 m di larghezza, come ad esempio nel caso del Po mostrato in [Figura 45](#).

Queste differenze di performance sono bene evidenziate dallo *scatterplot* dell'accuratezza globale vs. lo *f1-score* riportato in [Figura 47](#) che evidenzia tre diversi gruppi (blu, verde e rosso) di *performance*, rispettivamente, scarsa, intermedia e ottima. Gli elementi di ognuno di questi gruppi condividono simili larghezze dell'area bagnata al momento dell'acquisizione (la larghezza è proporzionale al colore del marker in figura).

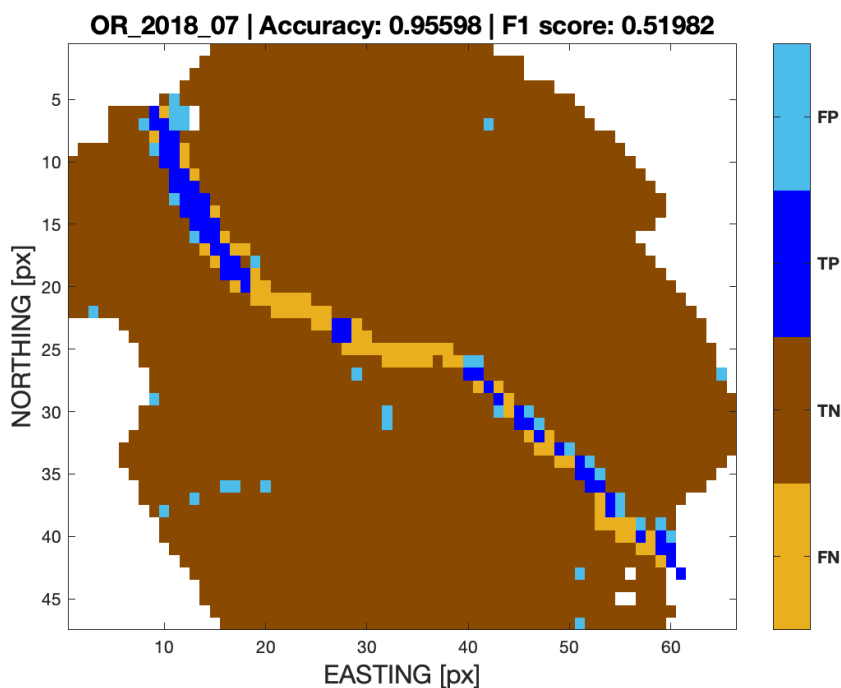


Figura 46 – Validazione fiume Paglia, località Orvieto (acquisizione OR_2018_07).

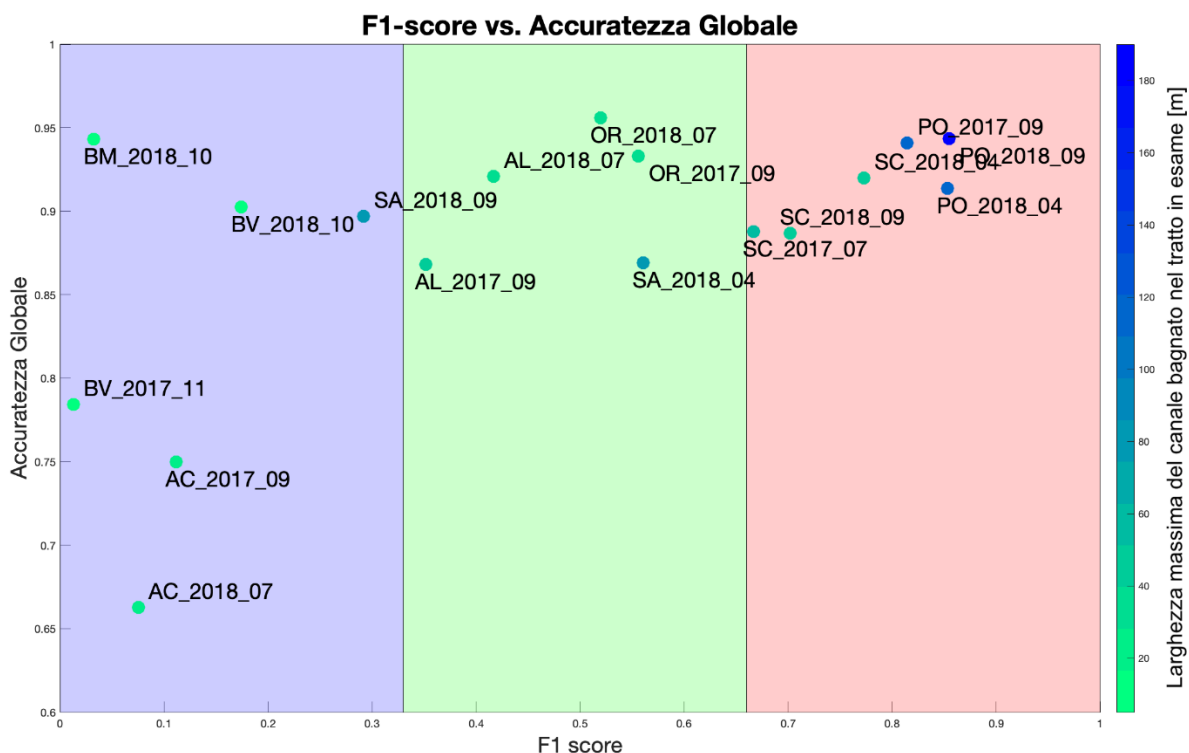


Figura 47 – Scatterplot di Accuratezza globale e F1-score. I colori dei marker fanno riferimento alla larghezza massima dell'area bagnata, mentre le aree blu, verde e rossa evidenziano tre diverse classi di performance della classificazione.

I limiti nella performance per fiume di larghezza inferiore ai 60 m dipendono principalmente dalla risoluzione del dato S1 in input e non dal criterio utilizzato dal toolbox per identificare le unità sommerse (si veda sezione [Base fisica del classificatore](#)). Inoltre, la forte asimmetria tra accuratezza globale e f1-score è generata dallo sbilanciamento del dataset, in cui la presenza di pixel positivi (acqua) è molto minore di quella dei pixel negativi (non acqua); ciò impatta negativamente sulla resa di questa metrica, come facilmente intuibile dall'([Equazione 5](#)).

Limiti tecnici

Per quanto riguarda le problematiche strettamente legate all'algoritmo è necessario commentare i frequenti falsi positivi introdotti dalle aree agricole. Queste rappresentano, nella particolare circostanza di piogge intense intercorse a pochi giorni dell'acquisizione SAR, un ostacolo alla corretta classificazione della scena. Ciò avviene perché le aree agricole o altri tipi di suolo soggetti a facile saturazione generano meccanismi di *scattering* molto simili a quelli di uno specchio d'acqua. La differenza tra le due, che seppur piccola esiste per natura fisica, è totalmente annullata a causa dello *speckle* generato, invece, dalla fisica di osservazione del SAR. Un esempio lampante di questo effetto si ha dal confronto della classificazione del tratto di valle della fiumara Bonamico per il quale si ottengono due diverse classificazioni nel 2017 e nel 2018 dovute probabilmente a condizioni climatiche piuttosto diverse nei due periodi di acquisizione (come riportato in [Figura 48](#)). L'accuratezza globale risente di questo effetto essendo 0.9 per il 2018 e meno di 0.8 per il 2017. Nella classificazione del 2017 appaiono aree ben distribuite di falsi positivi probabilmente dovute alla saturazione del suolo. Al momento comunque, non è chiaro quale processo fisico influenzi in questo modo la performance del classificatore e quanto, questo errore, sia effettivamente legato alla saturazione del suolo.

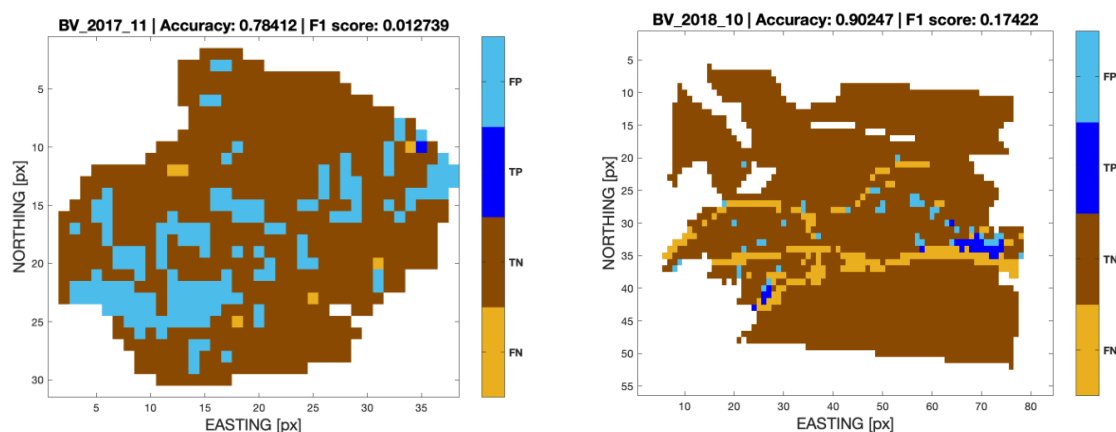


Figura 48 – Confronto tra due acquisizioni dello stesso sito (tratto a valle della fiumara Bonamico) in due periodi caratterizzati da condizioni climatiche diverse.

Questa problematica richiede studi aggiuntivi. In quest’ottica promettono molto bene le *Convolutional Neural Networks* (Krizhevsky et al, 2012), poiché queste riescono a tener conto delle differenze morfologiche che occorrono tra una superficie d’acqua, come l’alveo di magra, e altri tipi di superficie, come le barre di sedimento. Da sottolineare inoltre che, trovato il modo di distinguere acqua da suolo saturo, anche la seconda informazione relativa al grado di saturazione del suolo, che non è qui oggetto di studio, è un parametro fisico di grande interesse nel contesto del monitoraggio ambientale. A questo stadio di sviluppo del classificatore ai fini della sola classificazione delle unità sommerse si suggerisce, pertanto, di evitare di classificare scene acquisite su aree che sono state interessate da recenti precipitazioni. Nel caso si voglia comunque considerarle, per esempio per mappare periodi di piena, dove in caso di cielo nuvoloso anche le S2 non generano informazione utile, è consigliabile tenere conto di questo errore pianificando una fase di post-processing eventualmente manuale.

Infine, si segnala il problema delle ombre radar sebbene non sia stato riscontrato nei siti oggetto di studio. Negli scenari montuosi possono generarsi ombre radar, queste sono dovute alla geometria “*side-looking*” del SAR che osserva la superficie sotto un certo angolo di incidenza (circa 23° per S1) e si formano quando un ostacolo non consente al segnale di illuminare la superficie al di là di esso; statisticamente la zona in ombra risulterà essere molto simile all’acqua. Ovviamente, riguardando le aree montuose, per definizione il problema non si manifesta nella piana inondabile del fiume, laddove sono situati i siti oggetto di questo studio. In ogni caso, le aree di ombra radar potrebbero essere escluse semplicemente intersecando le classificazioni della stessa area in geometria ascendente e discendente, poiché l’acqua effettiva rimane la stessa, mentre le ombre radar cambiano essendo il lato di osservazione opposto.

In conclusione, è stato verificato un limite naturale dovuto alla risoluzione del dato in input che non permette la classificazione ottimale (i.e., $ACC > 90$ e $f1-score > 80$) di fiumi al di sotto della soglia dei 60 m di larghezza dell’area bagnata; il limite di risoluzione del dato è responsabile esclusivamente della generazione di falsi negativi. Sono state individuate, invece, due problematiche, ovvero l’errata classificazione del suolo saturo e le ombre radar, legate di più alla natura del sistema SAR e ai principi fisici e statistici utilizzati nell’algoritmo, che sono indipendenti dalla risoluzione e che sono responsabili della generazione dei falsi positivi. Per quanto riguarda la classificazione dell’area bagnata al di sotto della soglia indicata di 60 m è interessante pensare a sperimentazioni future dove si utilizzano dati Radar a maggior risoluzione spaziale quali ad esempio i COSMO SkyMed e TerraSAR-X.

Avanzamento delle attività: step futuri

Le attività previste nel prossimo anno, i cui risultati saranno riportati nella relazione finale (**Milestone M3**), riguarderanno i Task 3, 4 e 5 per l'estrazione definitiva degli indicatori idromorfologici elencati in [Tabella 1](#).

Per quanto riguarda l'habitat mapping da S1 (Task 3.1; **indicatore 1**), visti anche gli ottimi risultati ottenuti con il classificatore derivato da S2, si è deciso di focalizzare lo sviluppo del toolbox STORM per l'estrazione della maschera dell'area bagnata, per un singolo istante temporale, relativa alla macro-unità **unità sommerse**. Effettivamente lo sviluppo di questo argomento sembra offrire le migliori opportunità di ricerca e sviluppo per provare a valutare l'opportunità di elaborare uno strumento che, combinando i dati di S1 e S2, possa permettere di stimare la larghezza dell'alveo bagnato, e quindi le portate, con una frequenza quasi giornaliera da immagini satellitari, ai fini delle attività del T3.2 relativamente all'**indicatore 3**. L'ulteriore sviluppo della mappatura degli habitat da S1 è invece un tema di ricerca ancora immaturo ma che, anche a seguito delle opportunità di collaborazione nate grazie al presente accordo, sarà in parte oggetto di un dottorato di ricerca al DEIB.

Per l'estrazione delle classi granulometriche si utilizzeranno le informazioni derivate da *photosieving* delle immagini acquisite da drone e i valori di riflettanza delle immagini di S2 (Task 4.2; **indicatore 2**).

I DEM a precisione centimetrica generati a seguito di tutte le campagne di misura (T1.4), saranno confrontati tra loro per la generazione dei DoD-*DEMs of Difference*. Questi costituiranno la verità a terra per il confronto con i risultati delle analisi dei dati ottenuti da S1 e S2 nell'arco temporale di un anno ai fini dell'estrazione degli indicatori di processo (**indicatori 4 e 5**). Nello specifico, l'analisi si focalizzerà su alcuni siti per i quali sono stati osservati su campo dei cambiamenti morfologici significativi. Per quanto riguarda l'**indicatore 4**, congiuntamente alle analisi dell'assemblaggio delle macro-unità da S2 (si veda sotto), verrà analizzata l'evoluzione della maschera della macro-unità **unità sommerse** nel tempo per tutto l'arco temporale, nell'ambito delle attività del T3.3. Questo servirà per definire delle probabilità di presenza di acqua all'interno del corridoio fluviale per determinare l'involuppo delle zone inondate nell'arco temporale di studio e quindi, potenzialmente, l'alveo di *bankfull*. Inoltre, si cercherà di valutare la possibilità di stimare l'occorrenza di processi geomorfologici da S1 (**indicatore 5**) attraverso l'analisi delle coerenze per diversi intervalli temporali e dell'intensità di *backscatter* per le diverse macro-unità. Queste informazioni saranno combinate con i risultati dell'applicazione del modello di classificazione delle immagini S2 descritto in questa relazione alla serie temporale di immagini S2 scaricate per tutto l'arco temporale oggetto di studio, ai fini dell'analisi dell'assemblaggio delle macro-unità nel tempo e della loro dinamica (Task 4.1 e 4.3) per l'estrazione degli indicatori di processo (**indicatore 5**). Nell'ambito di queste attività e tematiche di ricerca si è formato recentemente una nuova collaborazione con un gruppo di lavoro dell'Università di Bolzano che coincide con l'inizio della tesi di dottorato dell'Ing. G. Marchetti, in precedenza parte dello staff del gruppo di lavoro DEIB nell'ambito del presente accordo, sotto la supervisione del Prof. F. Comiti, che è uno degli autori della metodologia IDRAIM.

Infine, le metodologie e gli strumenti sviluppati per l'estrazione degli indicatori come risultato delle attività dei Task 1-4 saranno applicate lungo le aste principali dei fiumi in esame nell'ambito del Task 5.

Per le attività dell'ultimo anno, in particolare per l'applicazione di modelli e algoritmi di classificazione alla serie temporali e lungo le aste principali dei fiumi oggetto dell'accordo, si è deciso che verrà creata manualmente una maschera del corridoio fluviale per fotointerpretazione su *Google Earth* e a partire dal vettoriale del fondo valle (pianura alluvionale) ottenuto tramite toolbox *Fluvial Corridor* (Roux et al., 2015) usando DEM a scala nazionale a 20 m. Sarà quindi verificata la possibilità di definire all'interno del corridoio fluviale e lungo le aste principali dei fiumi quella parte di fiume più frequentemente interessata dai processi

idromorfologici, grazie allo studio dell'evoluzione delle macro-unità nel tempo definite combinando S1 e S2 (indicatori 4 e 5).

Bibliografia

- Belletti B, Rinaldi M, Bussettini 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, Demarchi L, Grabowski RC, Weisstener CJ, Van de Bund W. 2016. The Use of Remote Sensing to Characterise Hydromorphological Properties of European Rivers. *Aquatic Sciences* 78(1): 57-70. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0430-7>.
- Carbonneau PE, Bergeron N, Lane SN. 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research* 41: W11426. DOI:10.1029/2005WR003994.
- Carbonneau PE, Bizzi S, Marchetti G. 2018. Robotic photosieving from low-cost multirotor sUAS: a proof-of-concept. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.4298 [online] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.4298/full>.
- Carbonneau PE, Dietrich JT. 2017. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 473-486. DOI: 10.1002/esp.4012.
- 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(12): 6975-6988.
- Demarchi L, Bizzi S, Piegay H. 2017. Regional hydromorphological characterization with continuous and automated remote sensing analysis based on VHR imagery and low-resolution LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms* 42(3): 531-551. <https://doi.org/10.1002/esp.4092>.
- Detert M, Weitbrecht V. 2012. Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - a free stand-alone tool. *River Flow 2012 - Murillo* (Ed.) © 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8.
- Detert M, Weitbrecht V. 2013. User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in River Sediment Research - Fukuoka et al. (eds) © 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9* 1789.
- De Zan F, Monti Guarnieri A. 2006. "TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (9): 2352-60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>.
- Fonstad MA, Dietrich JT, Courville BC, Jensen JL and Carbonneau PE. 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 421-430. DOI: 10.1002/esp.3366
- Graham DJ, Rice SP, Reid I. 2005. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels, *Water Resources Research* 41: W07020.
- Hedger R, Dodson J, Bourque JF, Bergeron N, Carbonneau PE. 2005. Improving juvenile Atlantic salmon habitat modelling through the use of high resolution airborne remote sensing. *Proceedings of the 26th Canadian Symposium on Remote Sensing*, 269-276.
- Henry JB, Chastanet P, Fellah K, Desnos YL. 2006. Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing* 27(10): 1921-1929.
- Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. 2012. ImageNet classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in neural information processing systems* 25, NIPS 2012. <http://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks>.

Lane SN, Westaway RM, Hicks DM. 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 249-271. DOI: 10.1002/esp.483.

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, Recent Advances in Mapping and Modelling Flood Processes in Lowland Areas* 36(7): 241-52. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.009>.

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.

Roux C, Alber A, Bertrand M, Vaudor L, Piégay H. “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology, Geomorphology in the Geocomputing Landscape: GIS, DEMs, Spatial Analysis and statistics* 242: 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>.

Sentinel online. User Guides - Sentinel-1 SAR - Product Types and Processing Levels. Accessed January 10, 2019. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels>.

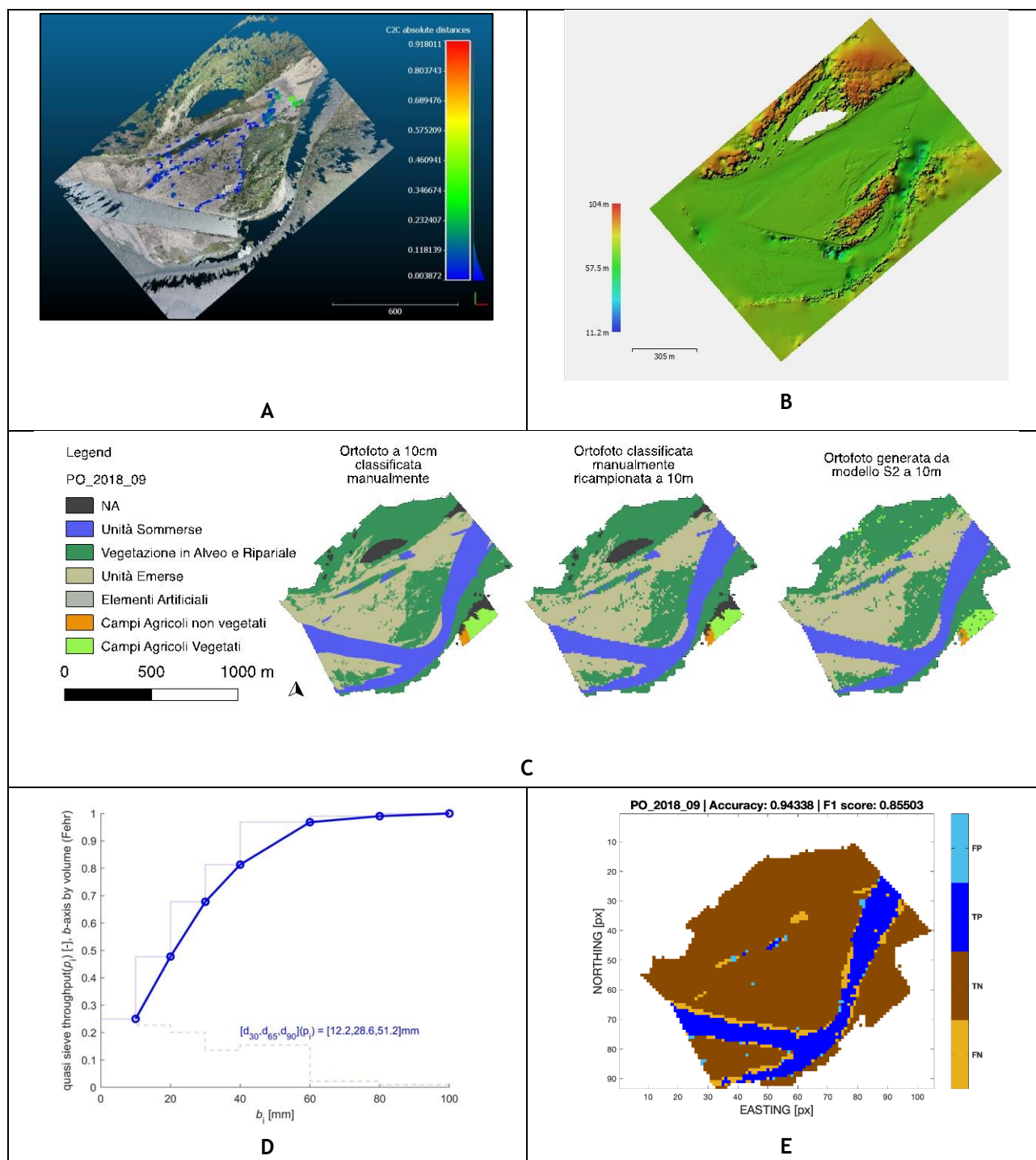
Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

Wheaton JM, Brasington J, Darby SE, Sear DA. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* 35: 136-156. DOI: 10.1002/esp.1886.

Wolman MG. 1954. A method of sampling coarse river - bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 35: 951-956.

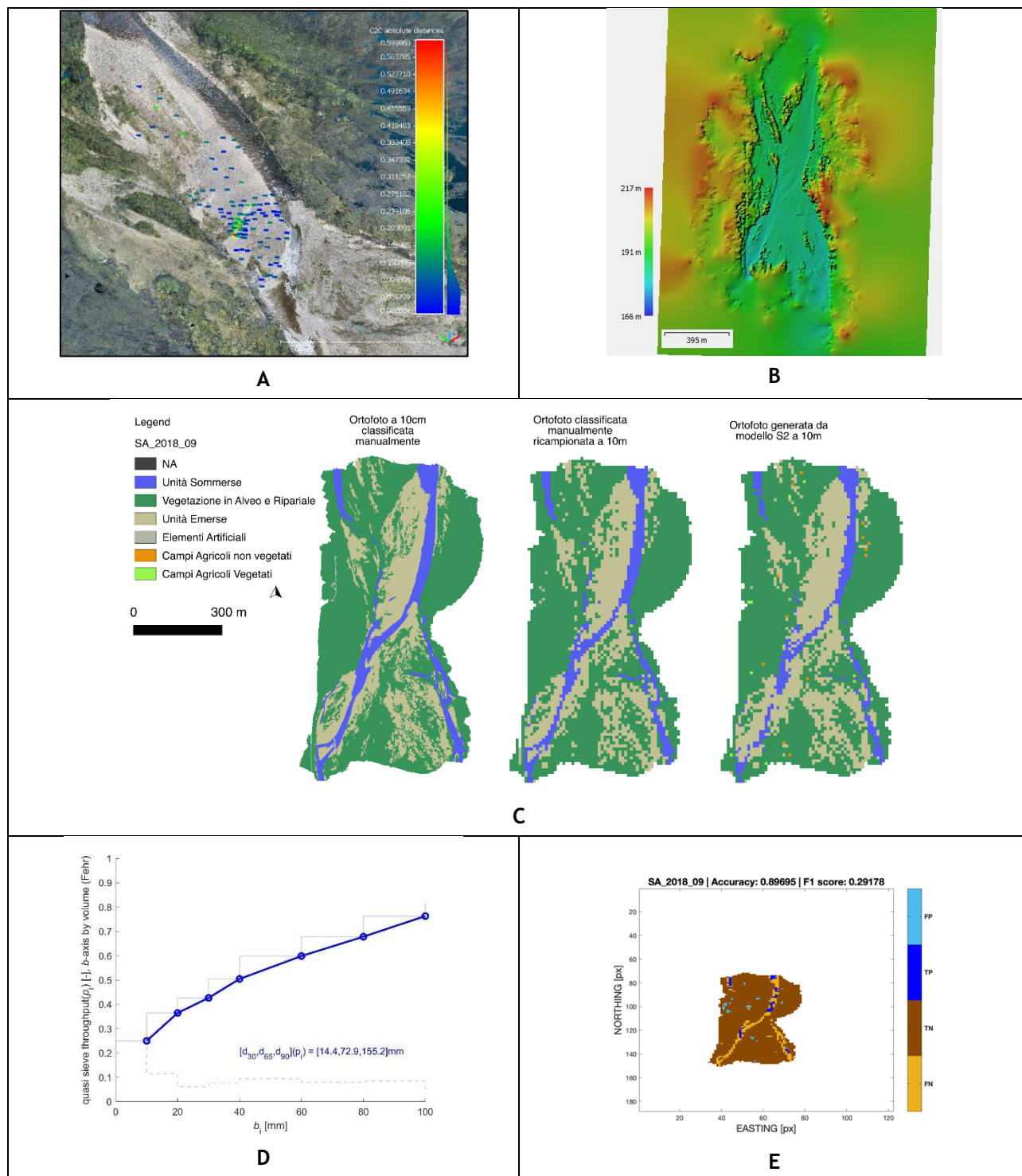
APPENDICE I

Sito: PO_2018_09



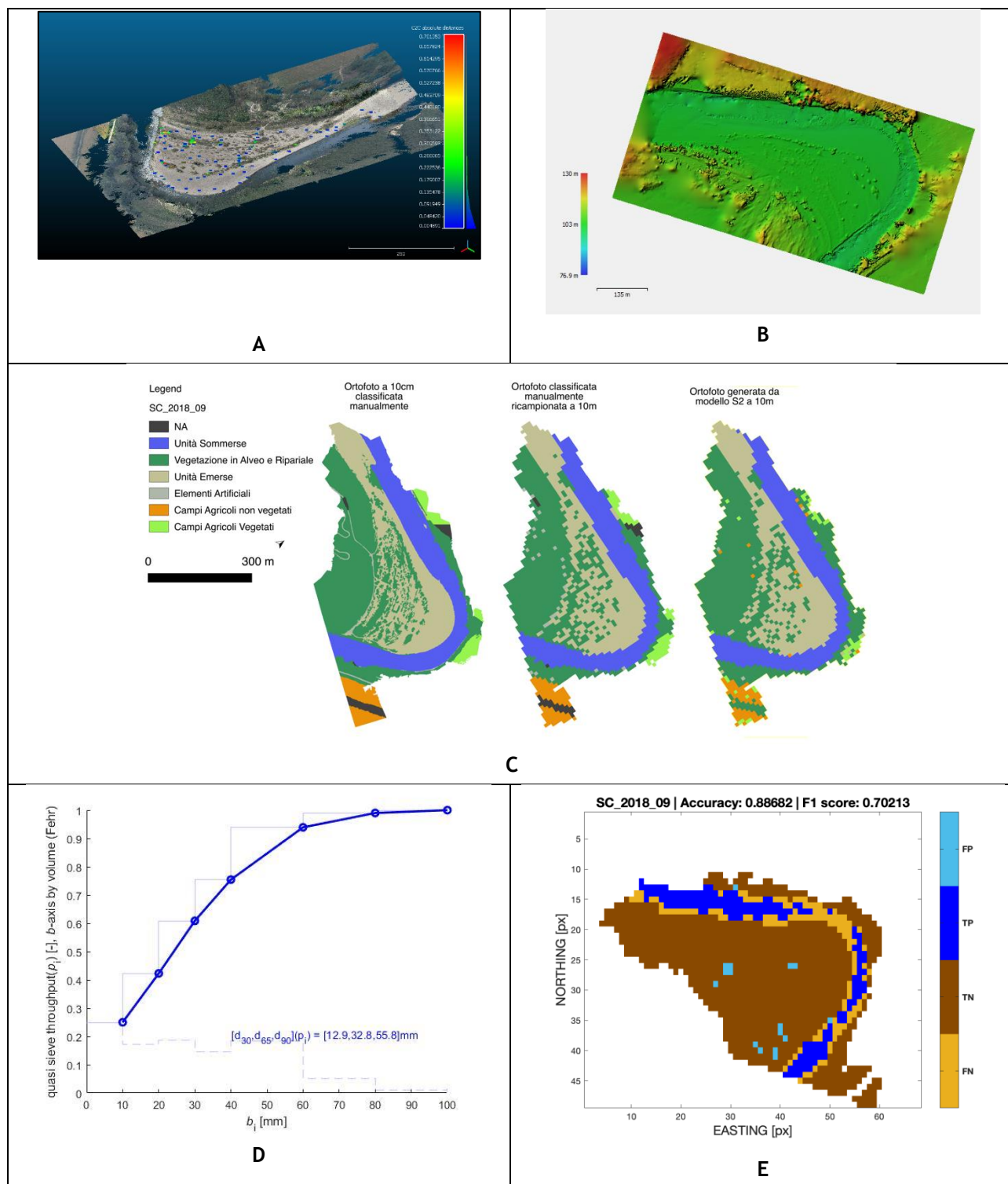
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: SA_2018_09



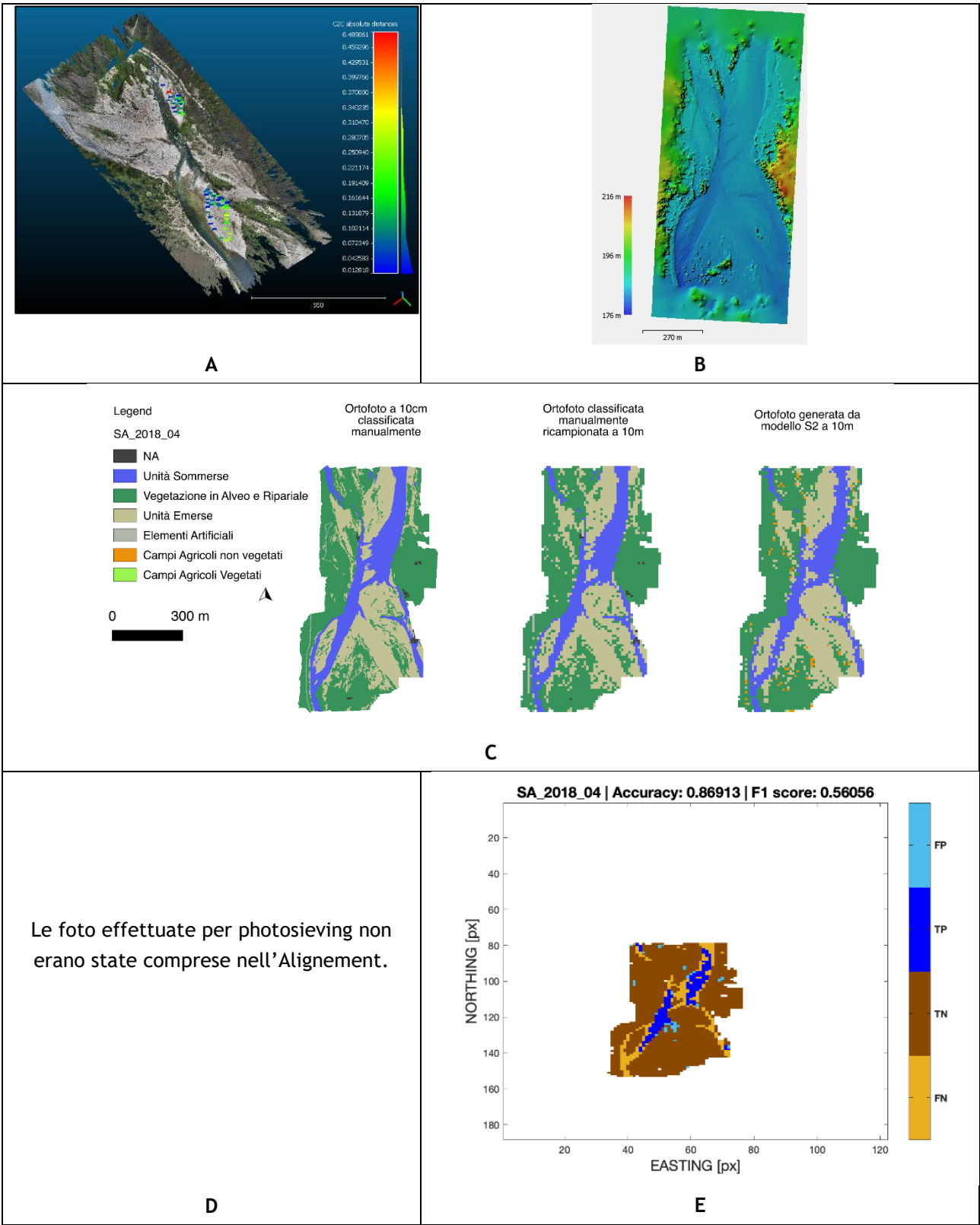
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: SC_2018_09



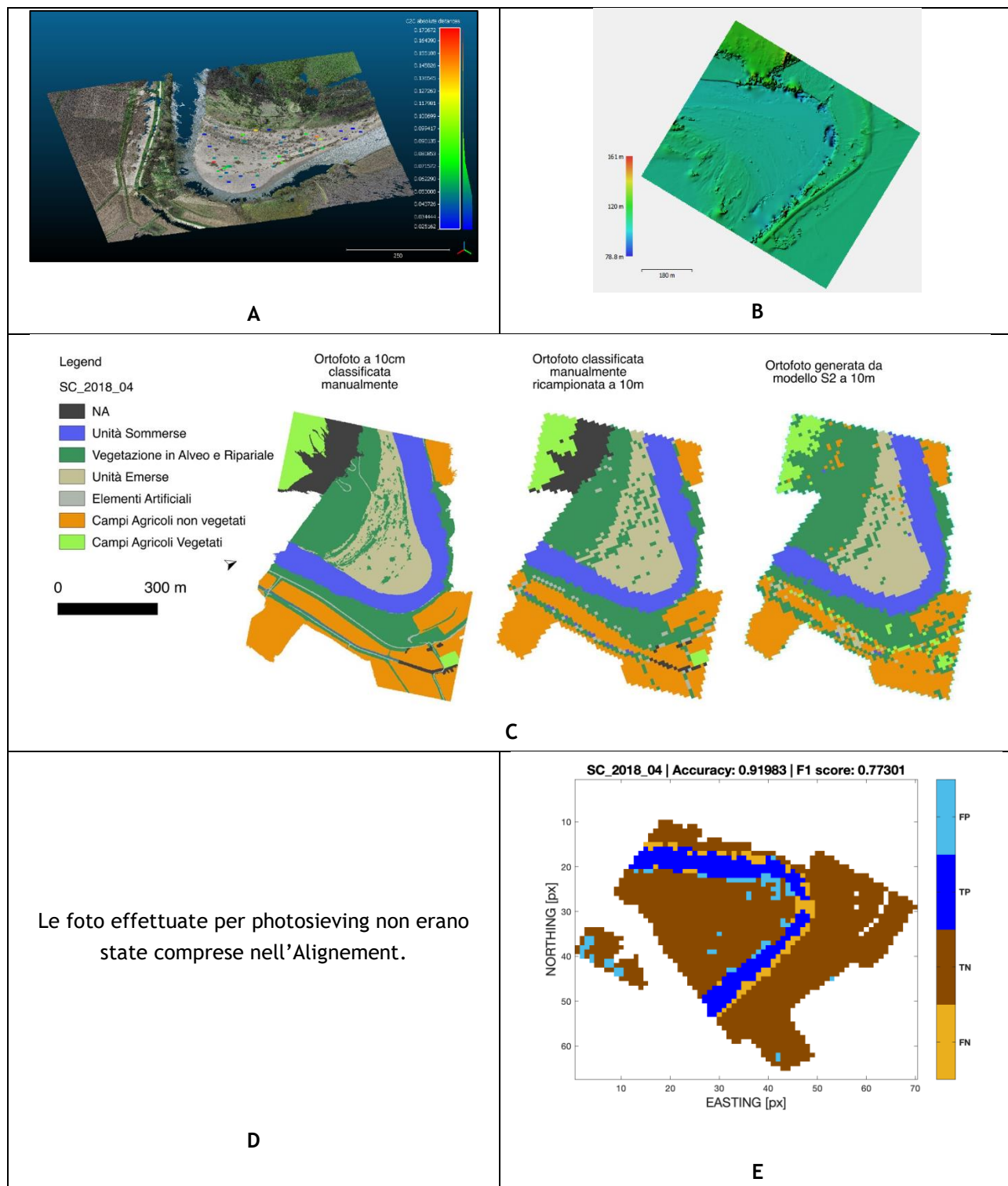
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Falsi Negativi (FN).

Sito: SA_2018_04



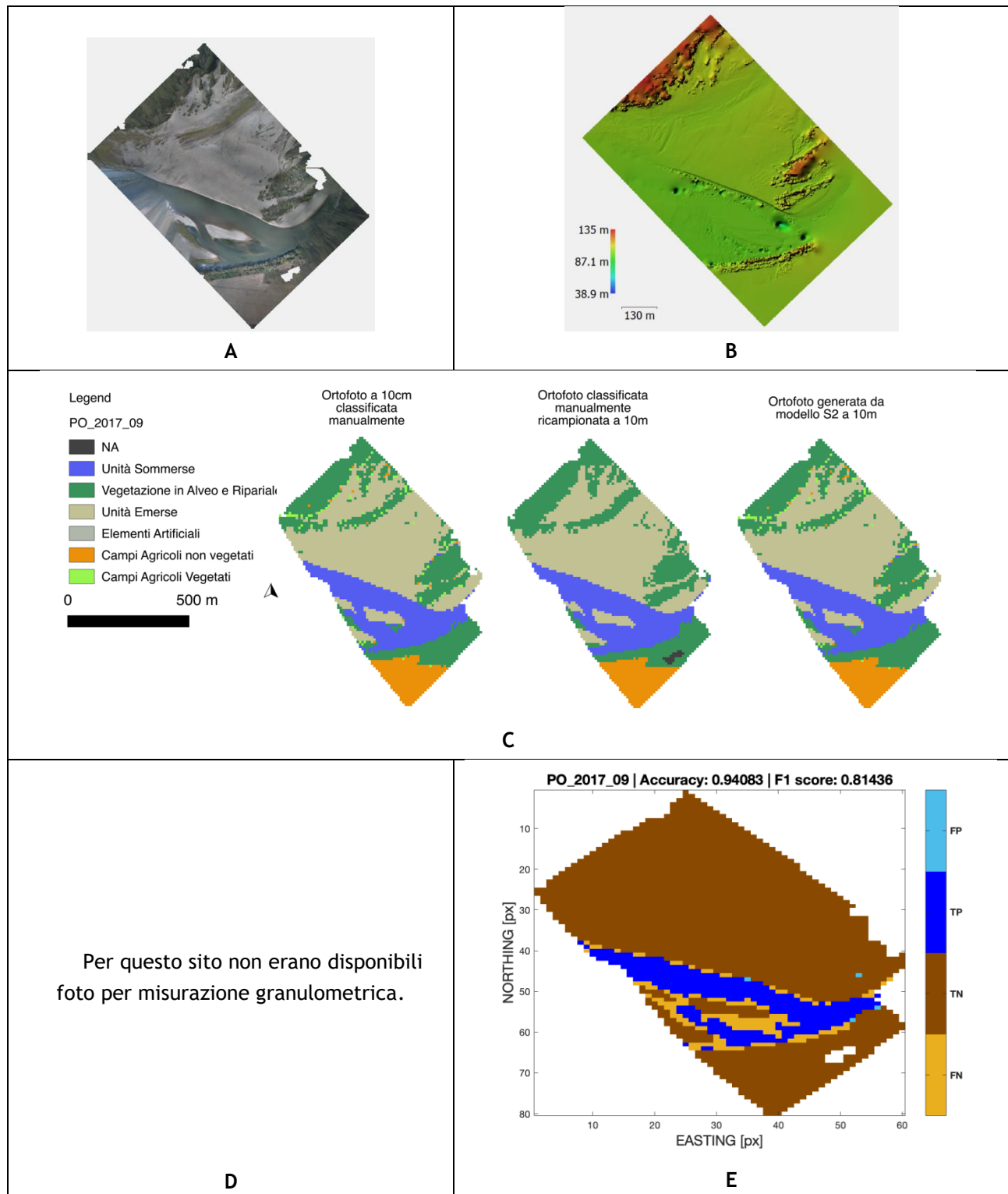
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: SC_2018_04



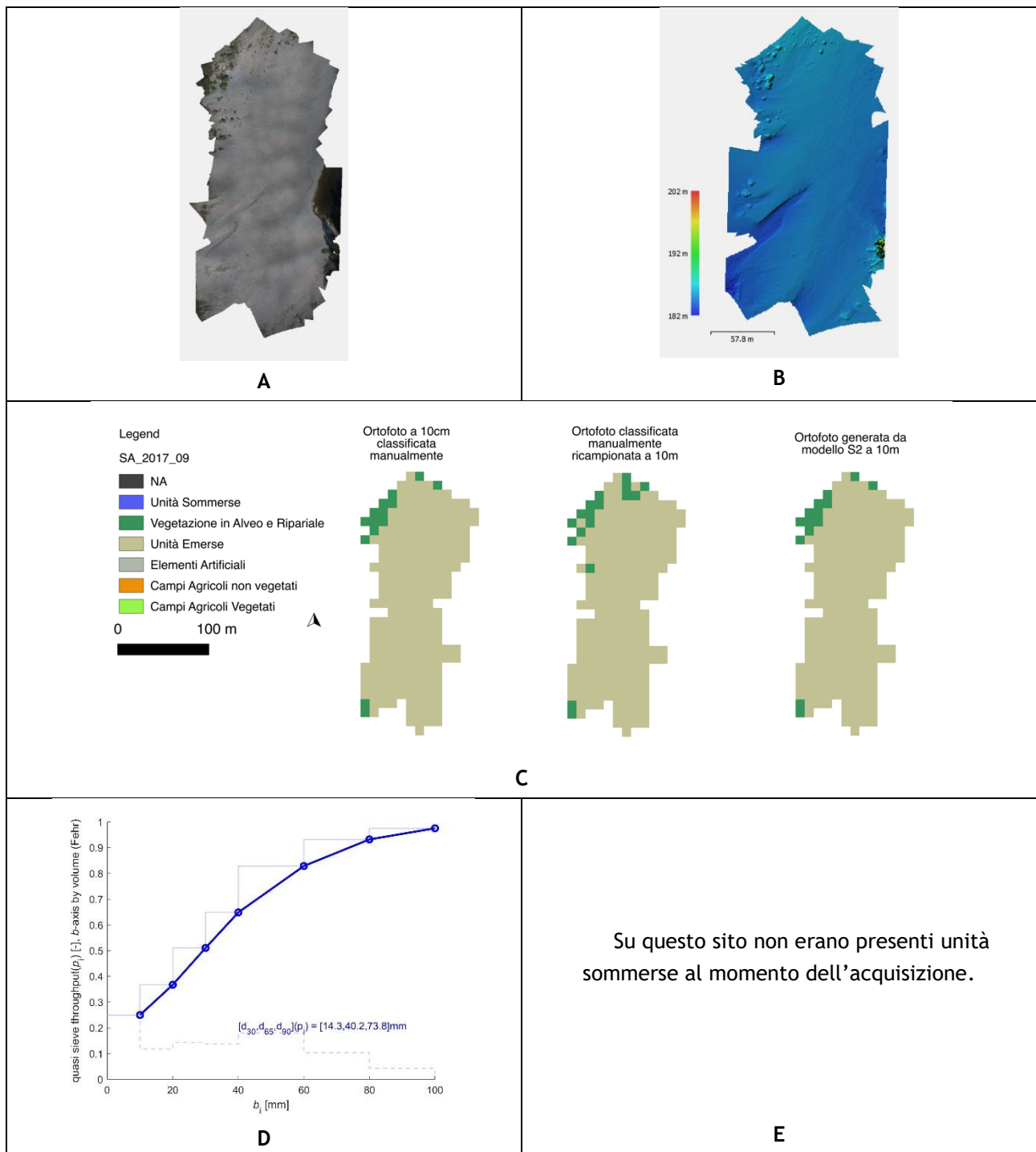
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: PO_2017_09



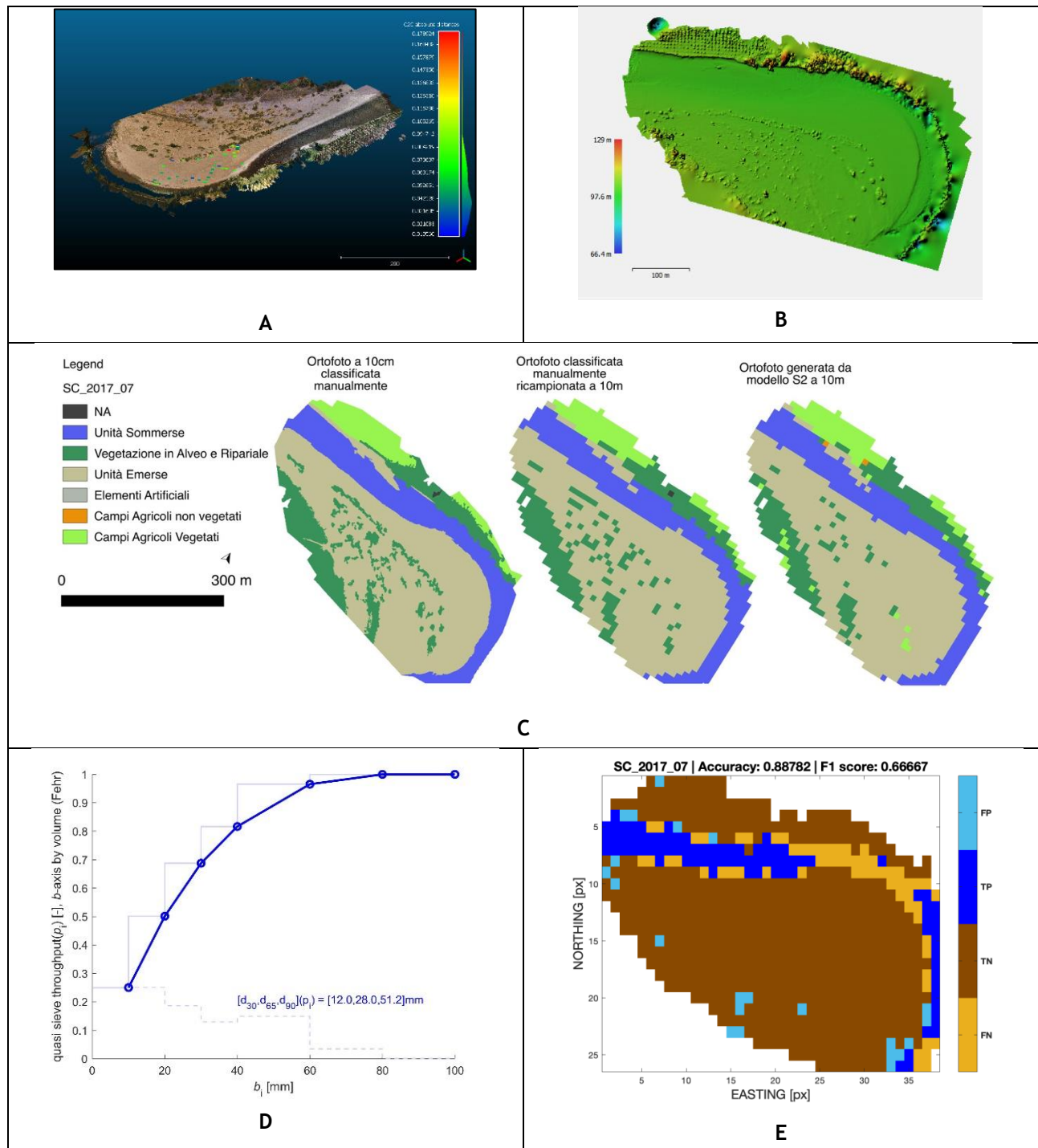
A) Ortofoto (su questo sito non sono disponibili i punti in continuo per il calcolo dell'errore di georeferenziazione); B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: SA_2017_09



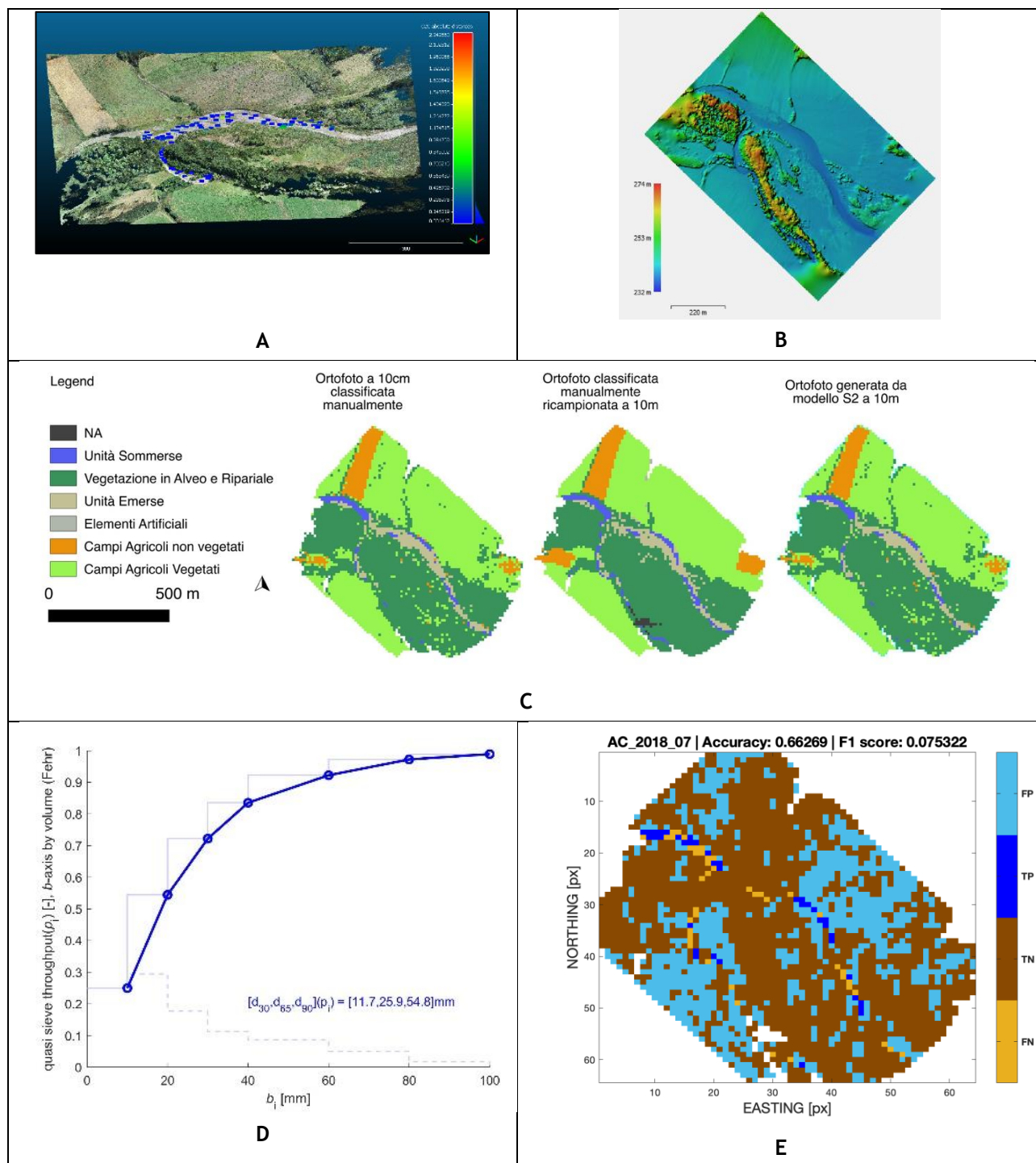
A) Ortofoto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2 D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1.

Sito: SC_2017_07



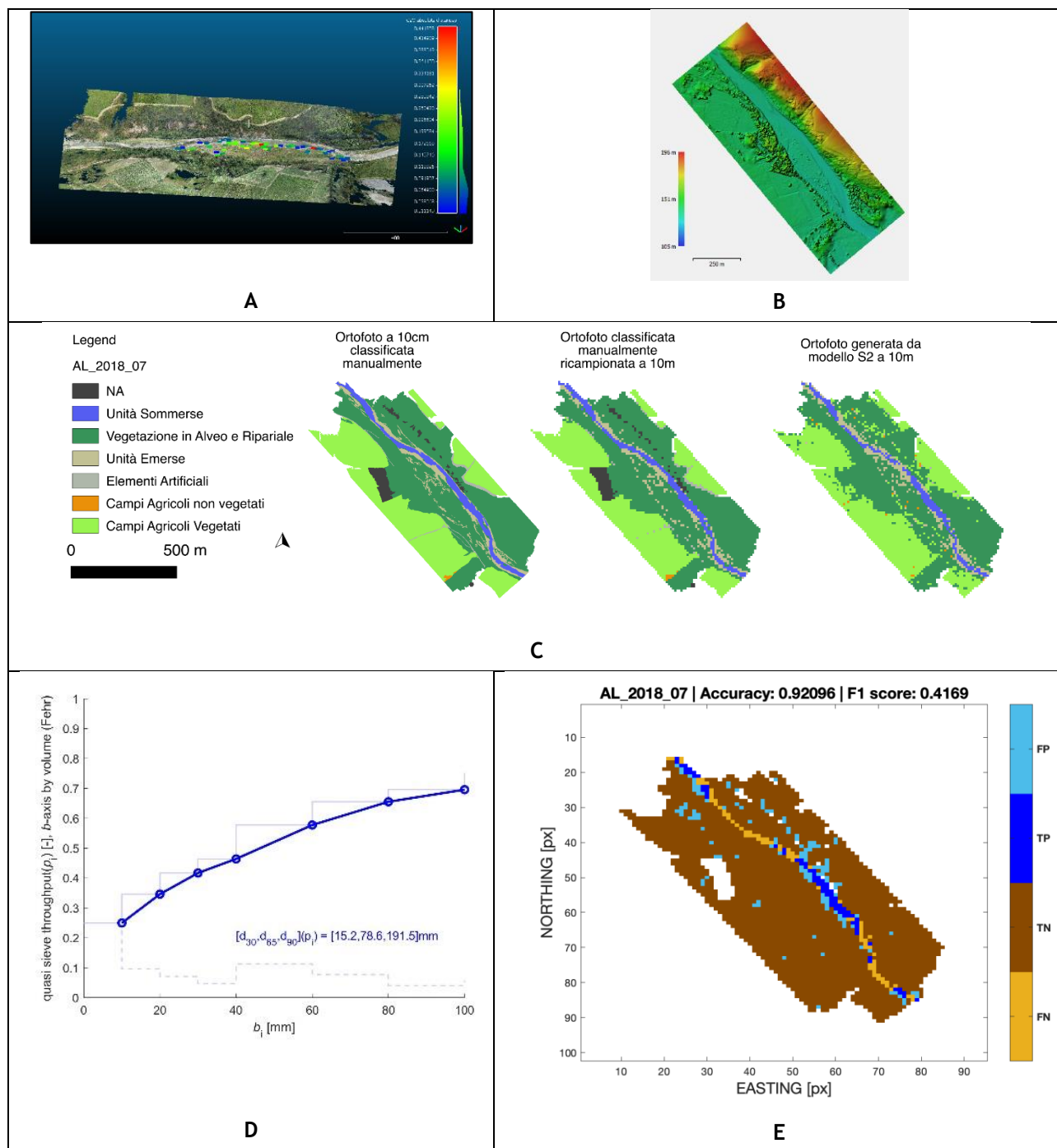
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: AC_2018_07



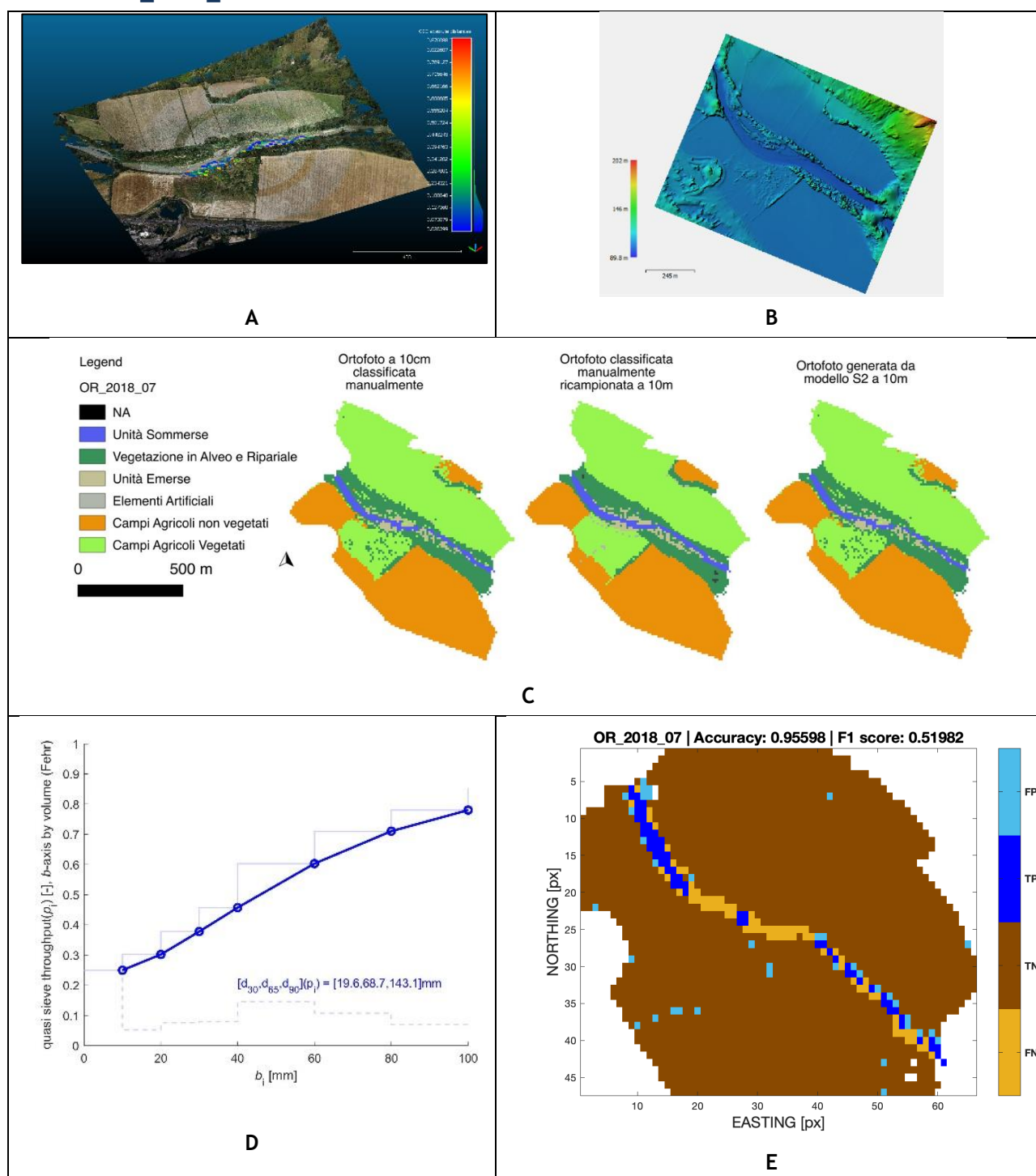
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: AL_2018_07



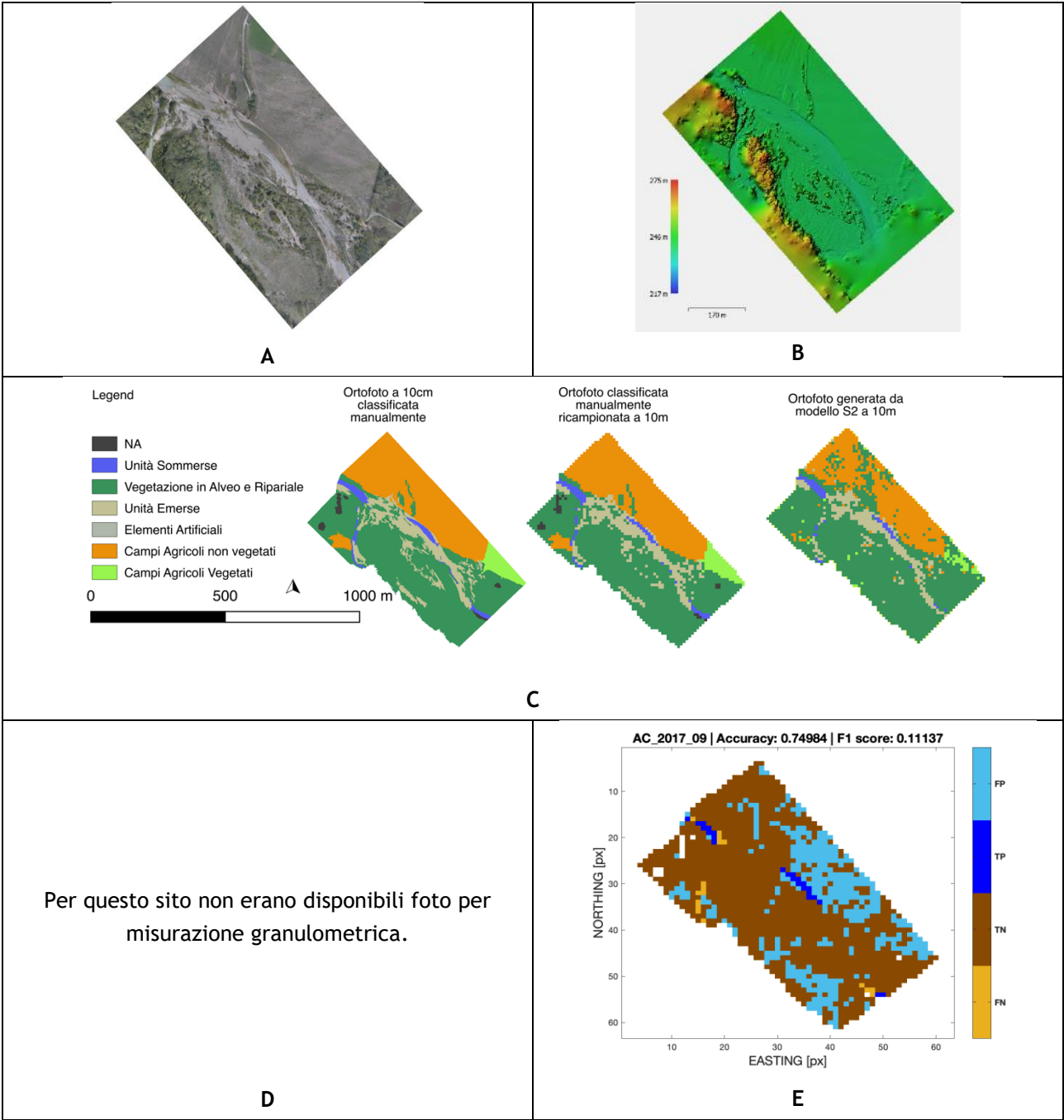
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: OR_2018_07

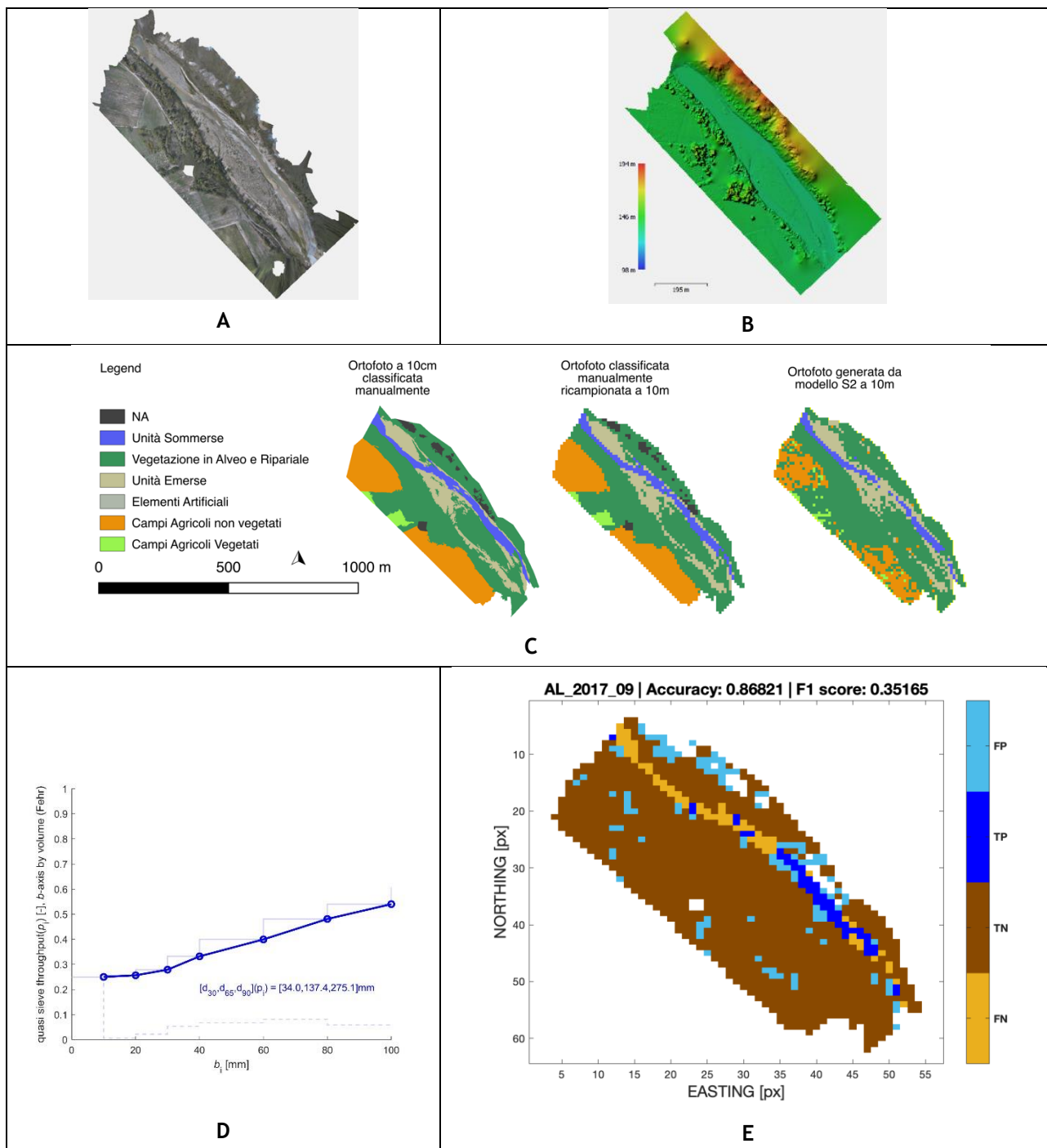


A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Falsi Negativi (FN).

Sito: AC_2017_09

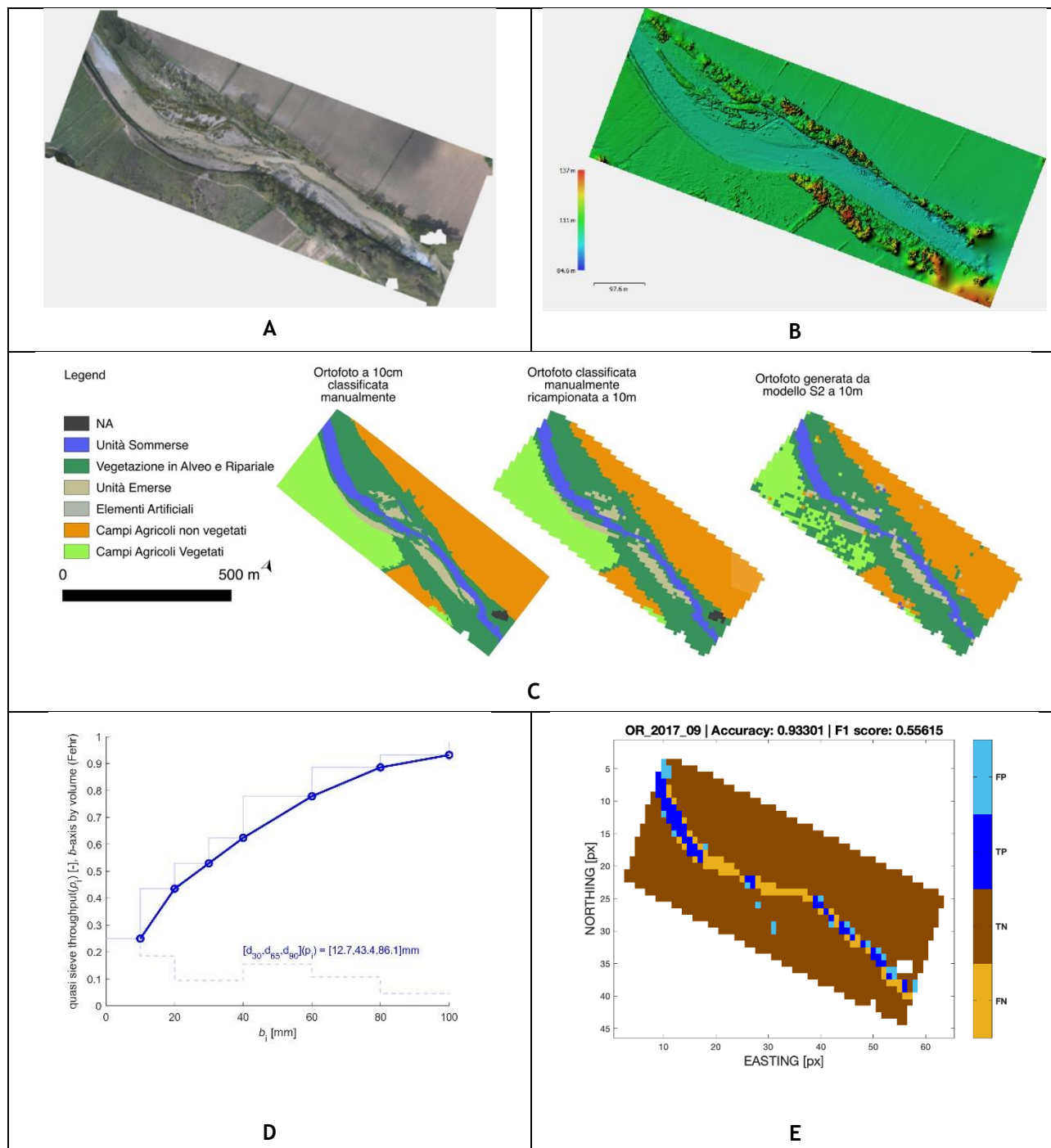


Sito: AL_2017_09



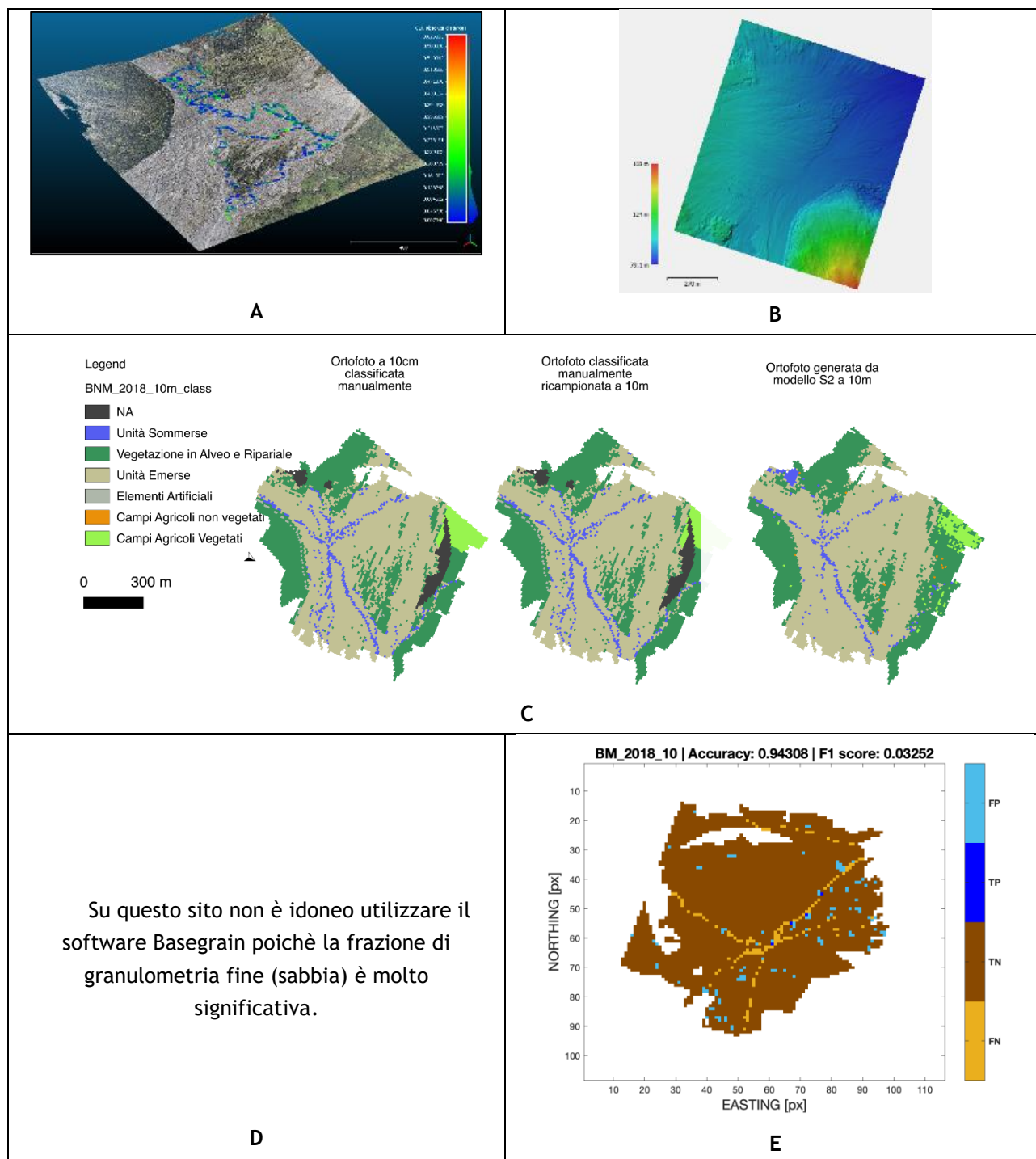
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: OR_2017_09



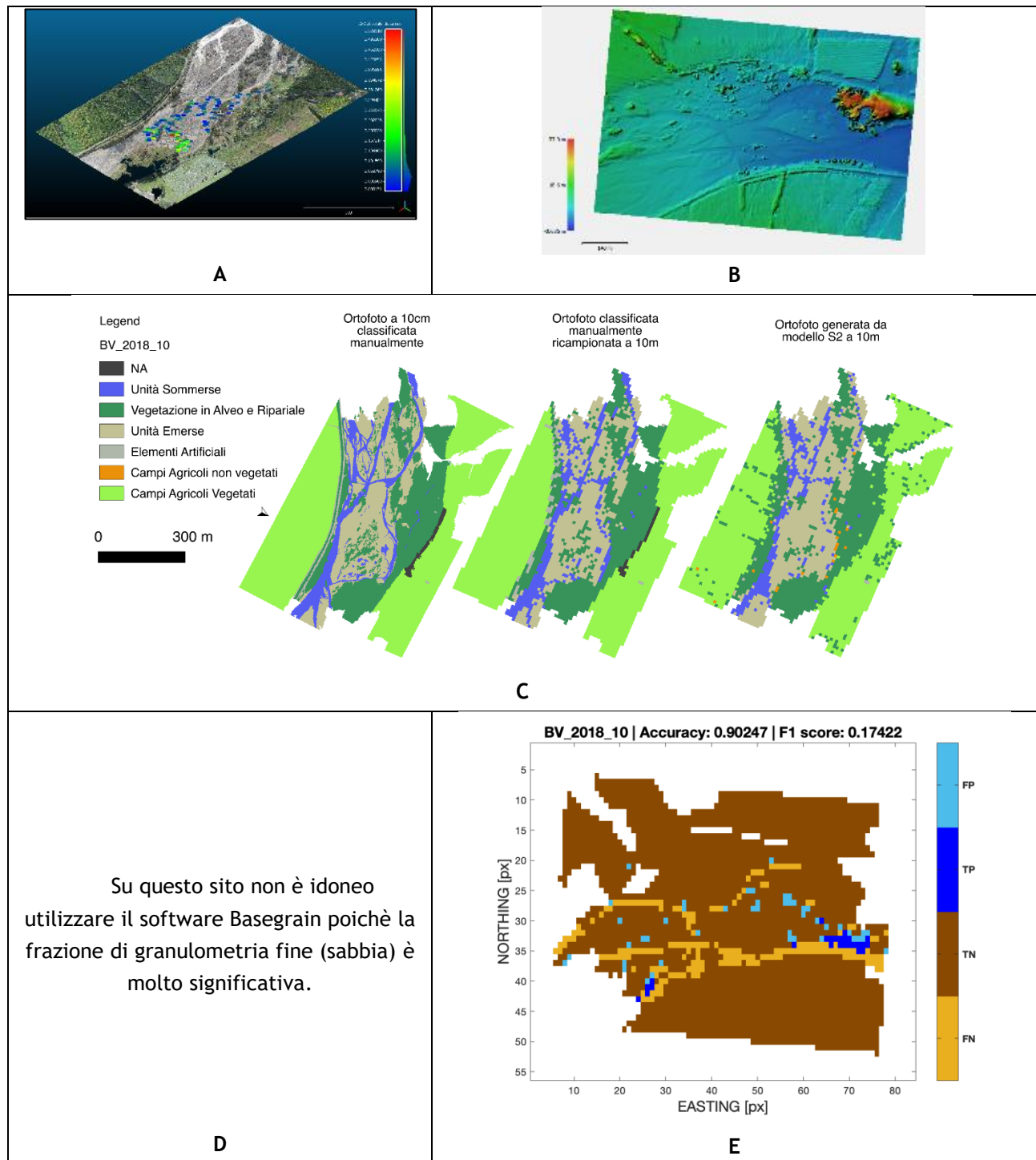
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; Curva granulometrica ottenuta a partire dalla misura degli assi dei grani compresi nell'immagine. Si riportano i valori dell'asse b (sulle ascisse), ricavati secondo il metodo di Fehr, e si calcolano i percentili (sulle ordinate), simulando una setacciatura (quasi sieve); E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: BM_2018_10



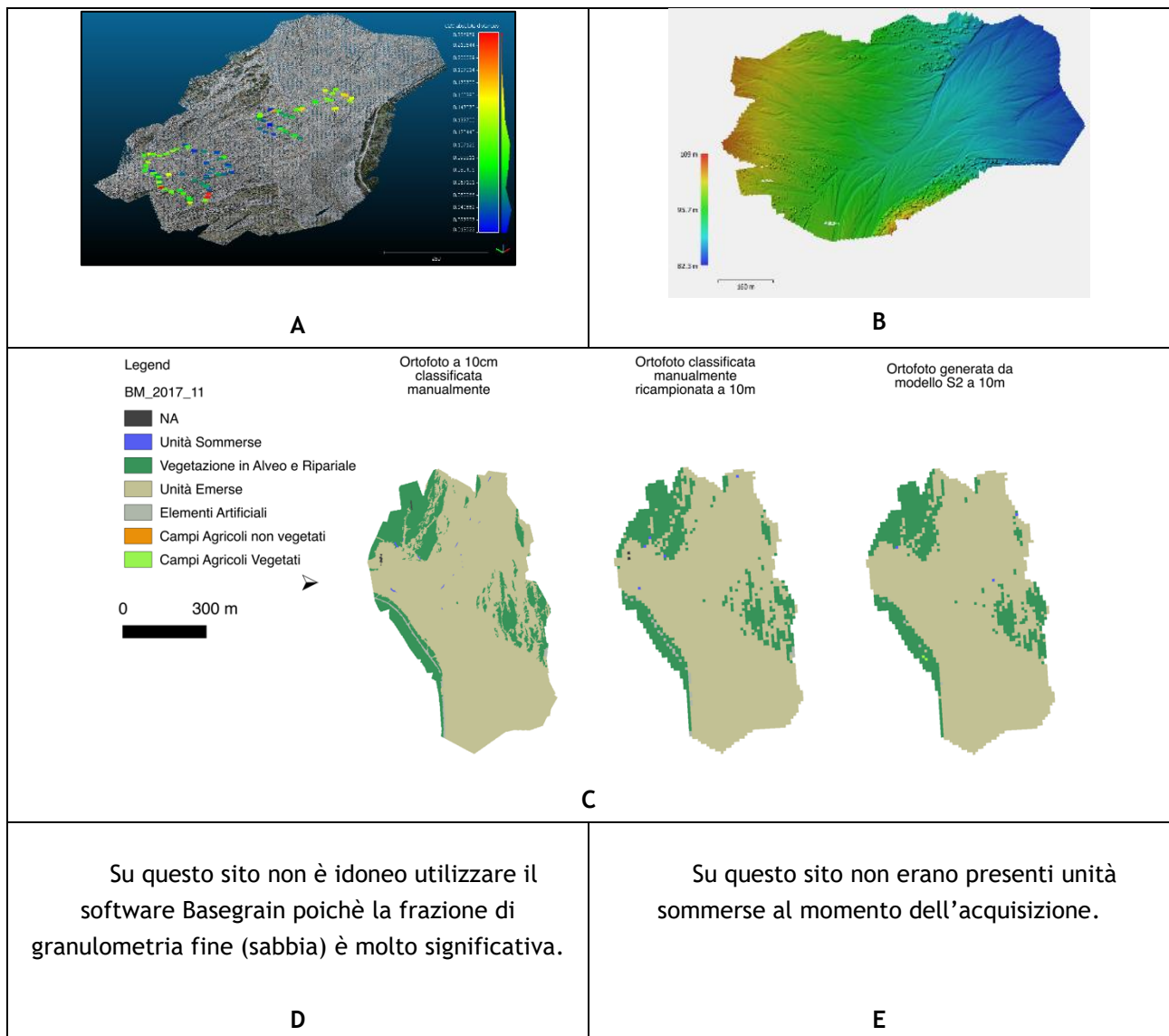
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: BV_2018_10



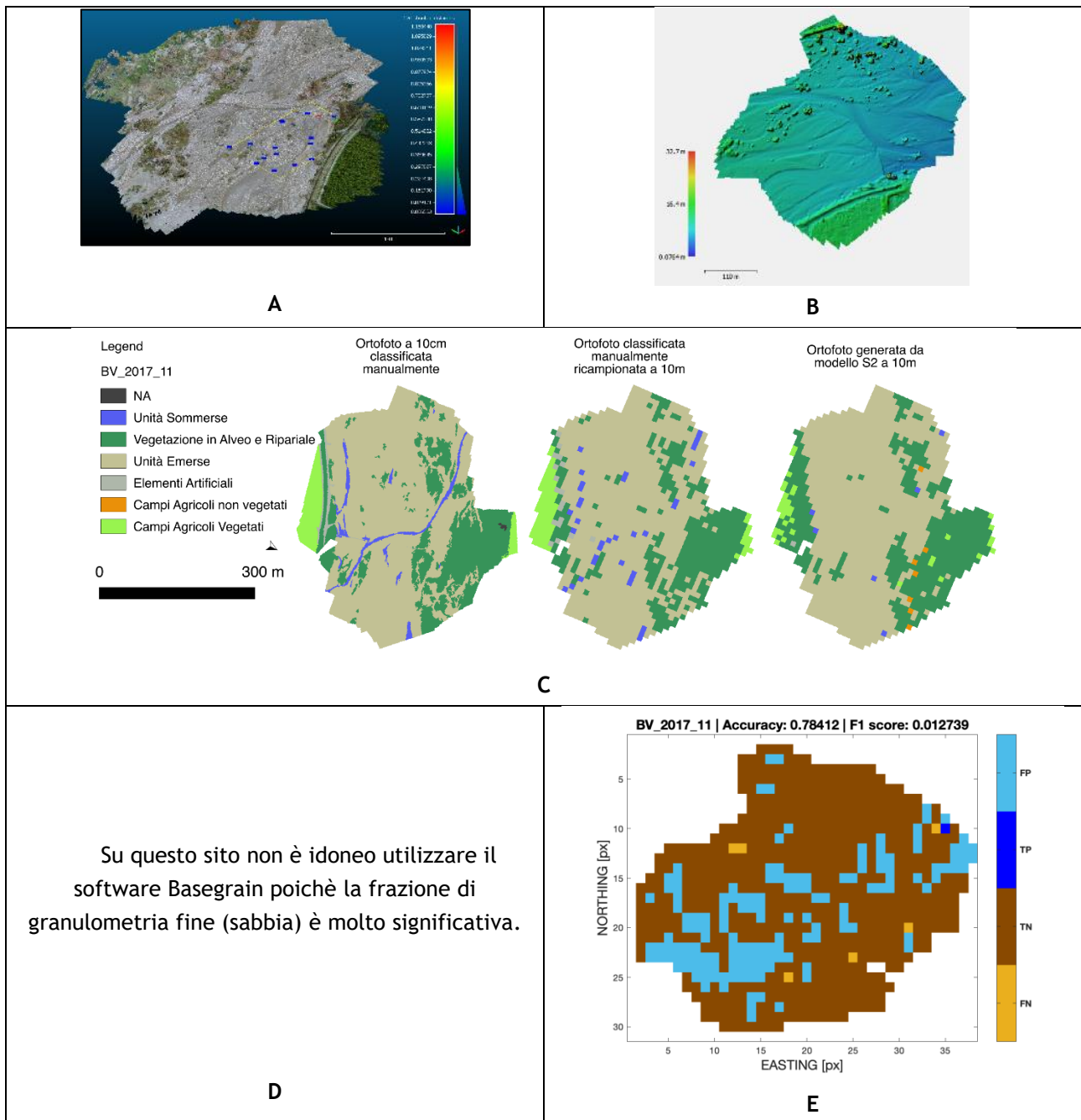
A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).

Sito: BM_2017_11



A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1.

Sito: BV_2017_11



A) Nuvola di punti (Dense Cloud) con punti di validazione colorati in funzione dell'errore di georeferenziazione (absolute distance) ottenuto; B) Digital Elevation Model: i colori sono proporzionali all'altezza topografica; C) Da sx verso dx: Classificazione manuale da ortofoto APR a 10 cm, stesso raster ricampionato a 10 m e raster a 10 m generato dal classificatore Sentinel-2.; D) Distribuzione granulometrica ottenuta da Basegrain; E) Classificazione unità sommerse da Sentinel-1 in cui si evidenziano i Veri Positivi (TP), Falsi Positivi (FP), Veri negativi (TN) e i Flasi Negativi (FN).