



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
Tuscia



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E FORESTALI

Corso di Dottorato di Ricerca in

Ingegneria dei Sistemi Agrari e Forestali - XXVII Ciclo

UTILIZZO DI UAV PER LA MAPPATURA DEL RISCHIO IDRAULICO

S.S.D. AGR/08 - Idraulica agraria e sistemazioni idraulico-forestali

Tesi di dottorato di:

Dott. Ettore Arcangeletti

Coordinatore del corso

Prof. Massimo Cecchini

Tutore

Dott. Ing. Andrea Petroselli

Co-tutore

Dott. Agr. Andrea Colantoni

16 Maggio 2016

Riassunto: La produzione di mappe di allagabilità, che rappresentano il principale strumento non strutturale a livello pianificatorio contro le problematiche del dissesto idrogeologico, segue in genere un approccio tradizionale basato sull'utilizzo della Formula Razionale per la determinazione dell'idrogramma di piena e sulla successiva propagazione di tale idrogramma nel DTM (Digital Terrain Model) attraverso un modello idraulico bidimensionale. Solitamente il modello DTM utilizzato deriva da un rilievo LiDAR (Light Detection and Ranging) oppure da rilevamenti topografici di dettaglio o da cartografie tecniche. In questa sede ci si propone di esplorare una metodologia alternativa e innovativa basata sull'utilizzo di un modello idrologico fisicamente basato (EBA4SUB – Event Based Approach for Small and Ungauged Basins) per la determinazione dell'idrogramma di piena; successivamente tale idrogramma, alternativo a quello ricavato con la formula razionale, viene veicolato nel DTM utilizzando sempre un modello idraulico bidimensionale per la simulazione idraulica; tuttavia in quest'ultimo caso il DTM è ricavato da un rilievo aereo-fotogrammetrico realizzato con UAV e strumentazione low cost. Obiettivo del presente lavoro è dunque analizzare e quantificare le differenze tra i diversi approcci valutando la misura in cui le variabili comparate, idrologica e morfologica, influenzano le mappe di allagabilità, con lo scopo di proporre una metodologia innovativa combinata per la produzione di tali mappe, sfruttando in particolare i vantaggi del DTM ricavato da UAV, quali in primis economicità, ripetibilità dei risultati e capacità di restituzione dei manufatti antropici.

Parole chiave: mappe di allagabilità, DTM, UAV, LiDAR, EBA4SUB, Formula razionale.

Abstract: The production of flood prone areas maps, that are the main non-structural instruments against the hydrogeological risk, generally follows a traditional approach based on the use of the Rational Formula for determining the design hydrograph and the subsequent propagation of such hydrograph in the DTM (Digital Terrain model) employing a bi-dimensional hydraulic model. Usually the DTM model used is derived from a survey LiDAR (Light Detection and Ranging) or by a topographic survey or digitizing the official cartography. Here we will explore an alternative and innovative methodology based on the use of a physically based hydrologic model (EBA4SUB - Event Based Approach for Small and Ungauged Basins) for determining the flood hydrograph. Such hydrograph, alternative to that obtained with the rational formula, will be conveyed in the DTM always using a bi-dimensional hydraulic model for the hydraulic simulation. However, in this case, the DTM is derived from a photogrammetric survey employing a UAV and a low cost instrumentation. The aim of this work is therefore to analyze and to quantify the differences between the two aforementioned different approaches evaluating how the input variables, both hydrological and morphological, affect the flooding maps. Moreover, aim of this work is also to propose a combined and innovative methodology for the production of such maps, using the advantages of DTM derived from UAVs, i.e. mainly the low cost, the repeatability and the capacity of reconstruct the man-made structures and buildings.

Keywords: flood areas maps, DTM, UAV, LiDAR, EBA4SUB, Rational Formula.

INDICE DEGLI ARGOMENTI

1) INTRODUZIONE	5
1.1) RISCHIO IDROGEOLOGICO.....	5
1.1.1) Generalità	5
1.1.2) Gestione del rischio idrogeologico: le mappe di allagabilità come strumento non strutturale.....	10
1.1.3) Stato dell'arte sulla produzione delle mappe di allagabilità: DTM e modellistica idrologica/idraulica.....	15
1.2) DETERMINAZIONE DELLA MAPPA DI ALLAGABILITA' TRAMITE RILIEVO TOPOGRAFICO TRADIZIONALE E DA DRONE: SCOPO DELLA TESI	29
2) MATERIALI E METODI	31
2.1) DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO: "PIAN DI MAIERE"	31
2.2) DTM TRADIZIONALI PER LA MODELLISTICA IDRAULICA: LiDAR.....	34
2.3) DTM INNOVATIVI: RICOSTRUZIONE TRAMITE UAV.....	37
2.3.1) Scelta della piattaforma e del sensore	38
2.3.2) Descrizione del UAV, delle apparecchiature e delle configurazioni	40
2.3.3) Fotogrammetria close-range.....	44
2.3.4) Pacchetto software di processing delle immagini	48
2.3.5) Pianificazione della missione.....	51
2.3.6) Dati tecnici della missione	53
2.3.7) Rilievo dei punti di controllo (GCP).....	54
2.3.8) Processing immagini	55
2.4) MODELLISTICA IDROLOGICA.....	67
2.4.1) Metodo concettuale della Formula Razionale dell'Autorità di Bacino del Tevere	68
2.4.2) Modello idrologico avanzato EBA4SUB.....	72
2.5) APPLICAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE E DETERMINAZIONE DELLE MAPPE DI ALLAGABILITA'	74
2.5.1) Caratteristiche del modello di propagazione.....	74
2.5.2) Applicazione di FLO-2D al caso di studio del Fosso del Maschiolo.....	75
3) RISULTATI	81
3.1) COMPARAZIONE DEI DTM.....	81

3.2)	MODELLISTICA IDROLOGICA: IDROGRAMMI DI PROGETTO DELL'ONDA DI PIENA	88
3.3)	DETERMINAZIONE DELL'AREA DI ESONDAZIONE	93
4)	CONCLUSIONI	112
5)	BIBLIOGRAFIA	116

1) INTRODUZIONE

1.1) RISCHIO IDROGEOLOGICO

1.1.1) Generalità

Nell'ambito dei rischi ambientali che caratterizzano il nostro paese, uno di quelli che comporta un maggior impatto socio-economico è il rischio idrogeologico; con questo termine si fa riferimento al rischio derivante dal verificarsi di eventi meteorici estremi che inducono a tipologie di dissesto tra loro strettamente interconnesse, quali frane ed esondazioni.

Il rischio idraulico da intendersi come rischio di inondazione da parte di acque provenienti da corsi d'acqua naturali o artificiali risulta essere, anche secondo l'approccio dettato dalla normativa nazionale (L.267/98) in materia, il prodotto di due fattori: la *pericolosità* (ovvero la probabilità di accadimento di un evento calamitoso di una certa entità) e il *danno atteso* (inteso come perdita di vite umane o di beni economici pubblici e privati).

La pericolosità è un fattore legato sia alle caratteristiche fisiche del corso d'acqua e del suo bacino idrografico, sia alle caratteristiche idrologiche, ovvero intensità, durata, frequenza e tipologia delle precipitazioni nel bacino imbrifero dal quale si alimenta ogni corso d'acqua.

Il rischio idraulico inoltre può riguardare anche le opere idrauliche realizzate dall'uomo, qualora vengano meno le condizioni di sicurezza per il funzionamento delle stesse.

È necessario pertanto valutare tra i rischi idraulici anche la tenuta degli sbarramenti sui corsi d'acqua, l'efficienza di manufatti di scolo e scolmatura (canali e tombinature), la funzionalità dei sistemi di drenaggio delle acque piovane nelle zone urbanizzate e il corretto funzionamento dei sistemi di pompaggio per le aree di bonifica.

Le dimensioni del fenomeno vengono rese chiaramente da una panoramica di alcuni degli eventi che hanno interessato l'area italiana: 5.400 alluvioni e 11.000 frane negli ultimi 80 anni, 70.000 persone coinvolte e 30.000 miliardi di danni negli ultimi 20 anni. In conseguenza dell'alto impatto causato da tali fenomeni e, soprattutto, in seguito ai tragici eventi di Sarno (1998), il Ministero dell'Ambiente e gli Enti istituzionalmente competenti in quegli anni (ANPA, Dipartimento dei Servizi tecnici nazionali e

Dipartimento della Protezione civile) hanno dato avvio a un'analisi conoscitiva delle condizioni di rischio su tutto il territorio nazionale, con lo scopo di giungere ad una sua mitigazione attraverso una politica congiunta di previsione e prevenzione.

Altri studi sono stati effettuati tra cui uno dei più recenti dell'ISPRA ha realizzato la mosaicatura delle aree a diversa pericolosità idraulica redatte dalle Autorità di Bacino, Regioni e Province Autonome ai sensi del D. Lgs. 49/2010 (Figura 1.1). In proposito si riporta uno stralcio del “Rapporto di sintesi sul dissesto idrogeologico in Italia 2014” rivisto nel Marzo 2015 relativamente alle aree a pericolosità idraulica.

La superficie delle aree a pericolosità idraulica elevata (P3) in Italia è pari a 12.186 km² (4% del territorio nazionale). Lo scenario di pericolosità idraulica elevata non è attualmente disponibile per l'Autorità di Bacino Regionale delle Marche. La superficie delle aree a pericolosità media (P2) è di 24.358 km², pari all'8,1% del territorio nazionale. La superficie delle aree a pericolosità bassa (P1) è pari a 31.494 km² (10,4% del territorio nazionale). Lo scenario a pericolosità idraulica bassa non è attualmente disponibile per l'Autorità di Bacino Regionale delle Marche, l'Autorità di Bacino Conca-Marecchia e l'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli. Le aree a pericolosità idraulica P1 inoltre non sono state delimitate per il reticolo di irrigazione e bonifica relativamente al territorio della Regione Emilia Romagna, ricadente all'interno dell'Autorità di Bacino del Po.

Lo stesso rapporto in merito ai dati riferiti alla popolazione esposta alle alluvioni propone una valutazione basata sulla mosaicatura del rischio, di cui sopra, ed i dati del 15° censimento della popolazione ISTAT 2011. Dall'elaborazione dei dati, dove l'unità territoriale è rappresentata dalle 402.121 sezioni censuarie, è emerso che la popolazione esposta a rischio di alluvioni in Italia è pari a 1.905.898 abitanti nello scenario di pericolosità idraulica elevata P3 (tempo di ritorno fra 20 e 50 anni); a 5.842.751 abitanti nello scenario di pericolosità media P2 (tempo di ritorno fra 100 e 200 anni) e a 8.641.815 abitanti nello scenario di pericolosità P1 (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi), come tradotto in forma grafica nella figura 1.2.

La stima tiene conto della popolazione residente esposta al rischio di danni alla persona, che si intende morti, dispersi, feriti, evacuati. Per i comuni che sono stati classificati in prima classe, è riconosciuto comunque un rischio non nullo per la popolazione, in virtù della potenziale mancanza di perimetrazione del reticolo idrografico minore.

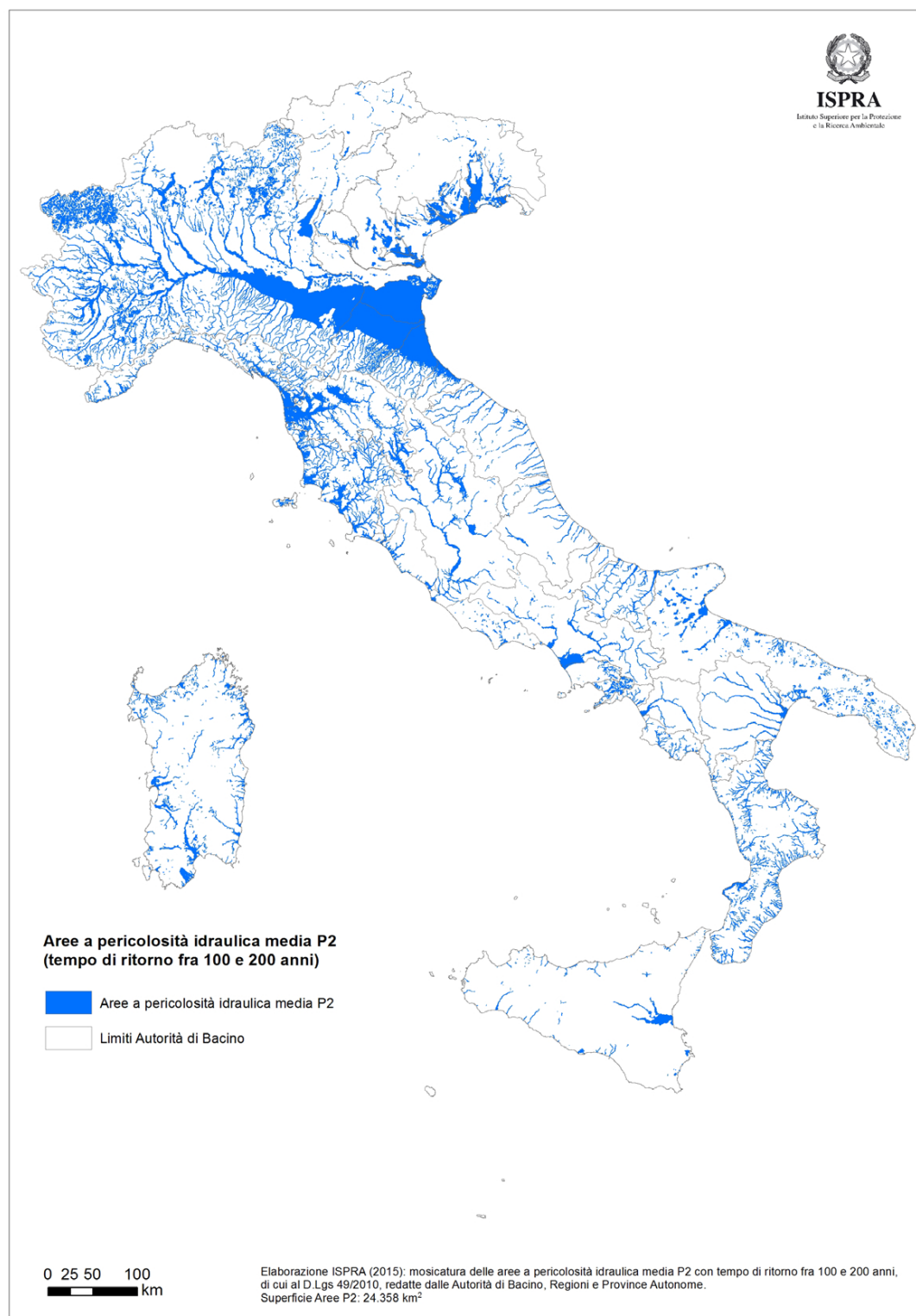


Figura 1.1 aree a pericolosità idraulica media P2 (Annuario dei Dati Ambientali, ISPRA 2015, in corso di pubblicazione)

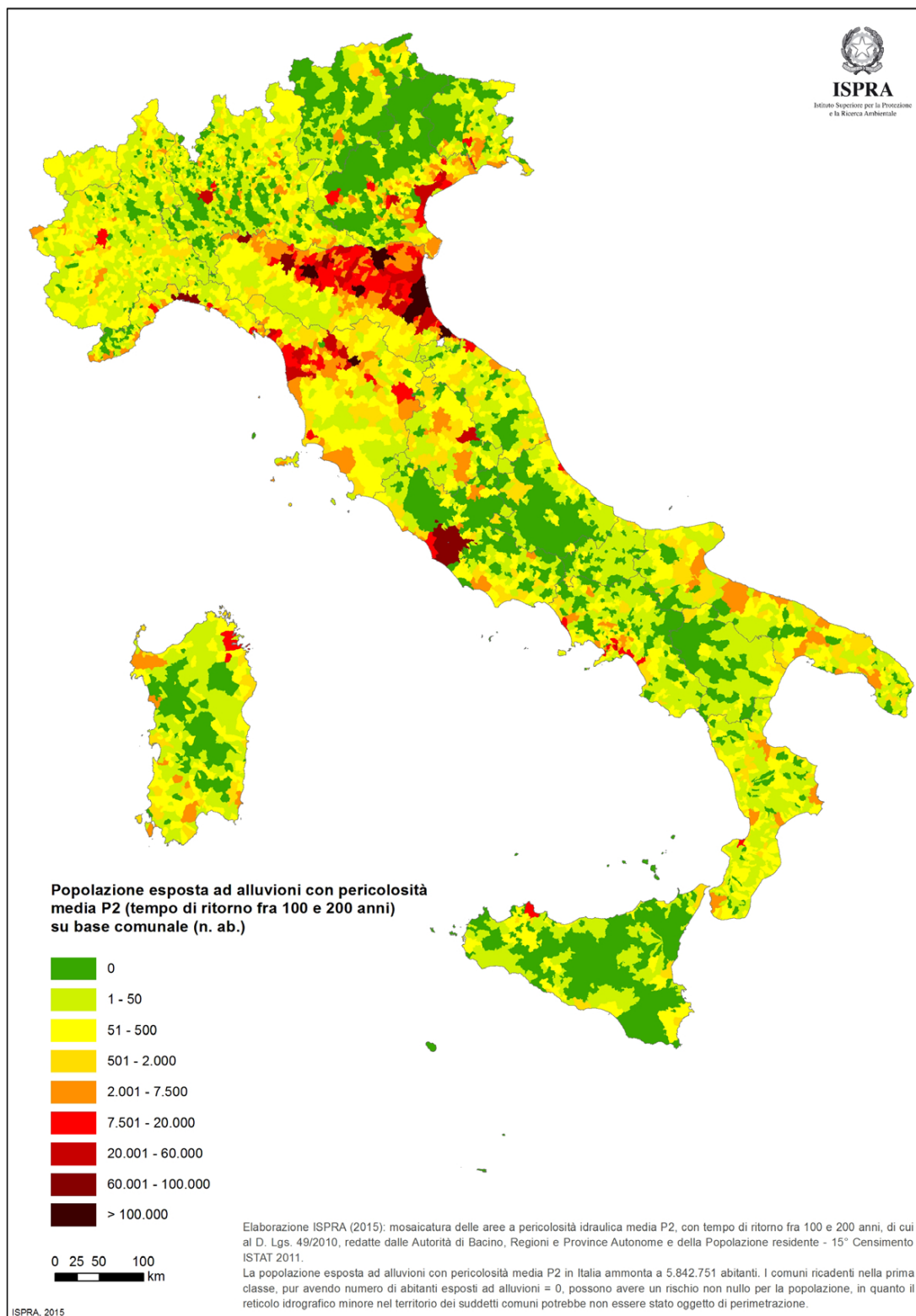


Figura 1.2 popolazione esposta ad alluvioni - scenario di pericolosità media P2 (Annuario dei Dati Ambientali, ISPRA 2015, in corso di pubblicazione)

Riportato in forma tabellare è ben evidente la portata del rischio e l'incidenza presente in tutte le Regioni, dove l'Emilia Romagna e la Toscana evidenziano la più alta incidenza in virtù della significativa presenza di aree a rischio.

Regione	Popolazione residente 2011	Popolazione esposta ad alluvioni – Scenario pericolosità media P2
Piemonte	4.363.916	220.407
Valle d'Aosta	126.806	12.702
Lombardia	9.704.151	280.434
Trentino Alto Adige	1.029.475	14.539
Veneto	4.857.210	440.603
Friuli Venezia Giulia	1.218.985	85.561
Liguria	1.570.694	253.378
Emilia Romagna	4.342.135	2.759.962
Toscana	3.672.202	951.422
Umbria	884.268	56.051
Marche	1.541.319	52.484
Lazio	5.502.886	123.685
Abruzzo	1.307.309	21.166
Molise	313.660	4.330
Campania	5.766.810	241.709
Puglia	4.052.566	119.034
Basilicata	578.036	3.640
Calabria	1.959.050	77.251
Sicilia	5.002.904	27.894
Sardegna	1.639.362	96.498
Totale Italia	59.433.744	5.842.751

Tabella 1.1 Popolazione esposta ad alluvioni - scenario di pericolosità media P2 (Annuario dei Dati Ambientali, ISPRA 2015, in corso di pubblicazione)

Preso atto dell'alto livello di rischio che caratterizza gran parte del territorio italiano, si è provveduto a dare impulso alla ricerca scientifica nei confronti di tali problematiche. Lo studio di queste ultime, oltre ad avere un indubbio interesse scientifico, riveste particolare importanza, poiché costituisce un indispensabile supporto alle amministrazioni competenti, nella definizione delle metodologie di studio del rischio idrogeologico, nell'individuazione e perimetrazione delle aree a rischio, nella sperimentazione di nuovi sistemi di controllo e di intervento per la salvaguardia dei soggetti a rischio (popolazione, centri abitati, infrastrutture).

Le ricerche svolte fino a oggi hanno messo in luce la complessità, nel nostro paese, dell'analisi del rischio idrogeologico, diretta conseguenza dell'estrema eterogeneità degli assetti geologico-strutturali, idrogeologici e geologico-tecnici e di

un'ampia gamma di condizioni microclimatiche differenti, anche in aree limitrofe o apparentemente simili. Se a tutto questo si somma il fatto che la penisola italiana, essendo geologicamente "giovane", è ancora soggetta a intensi processi morfogenetici che ne modellano in modo sostanziale il paesaggio, si comprende come i fenomeni di dissesto legati al rischio idrogeologico possano manifestarsi in relazione alle molteplici combinazioni di tutte le variabili in gioco secondo diverse modalità; sono perciò riscontrabili evidenti diversità dei suddetti fenomeni, soprattutto legati alle differenti entità dei volumi coinvolti, alla velocità del movimento, ai numerosi contesti territoriali in cui si possono verificare (area di fondovalle, pedemontana o di versante) e alle numerose tipologie (ad esempio crolli, scivolamenti, colate).

Per una efficace valutazione del rischio associato a un determinato evento atteso per una certa porzione di territorio, diventa allora indispensabile la conoscenza di tutti i fattori sopra indicati e, un approfondito studio dello stesso e dei fenomeni naturali che lo caratterizzano.

1.1.2) Gestione del rischio idrogeologico: le mappe di allagabilità come strumento non strutturale

Il quadro appena tracciato evidenzia la centralità dell'argomento nella gestione e pianificazione territoriale del nostro Paese, negli ultimi anni divenuta questione di forte dibattito a causa del ricorrente verificarsi di eventi disastrosi e talvolta catastrofici, che riportano tristemente all'attualità l'importanza del tema.

In ragione di ciò, non solo il mondo scientifico, ma anche l'opinione pubblica, ha manifestato una crescente attenzione verso le politiche di governo del territorio in merito alla difesa del suolo, come anche alla gestione delle aree sensibili adiacenti i fiumi ed i torrenti.

Nel processo di Pianificazione il PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico) funge da strumento legislativo utile a ridurre il rischio entro valori che siano compatibili con gli utilizzi del suolo (PAI, 2006), così da poter salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni ai beni esposti.

Tale gestione deve tener conto di una molteplicità di elementi e fattori, come in precedenza evidenziato, alcuni caratterizzati da una certa invariabilità, come ad esempio la geologia, il clima, la morfologia; altri fattori sono invece caratterizzati da una

maggiore variabilità nel breve periodo, tale da rendere il loro contributo talvolta determinante in ordine ad eventi calamitosi, anche di rilevante entità. Tra questi fattori vanno sicuramente ricordati il cambio dell'uso del suolo, le modificazioni delle pratiche agronomiche e forestali, come anche la gestione e la manutenzione delle aree inondabili limitrofe ai fiumi ed ai torrenti (floodplain).

Più attentamente è su quest'ultimo aspetto che occorre soffermarsi, quale elemento centrale della pianificazione di bacino: l'individuazione delle aree di esondazione e la loro gestione a riguardo delle opere e degli interventi per la riduzione del rischio idrogeologico.

Negli ultimi anni, sempre più spesso, ad interventi ed opere di grande rilevanza ingegneristica, vengono affiancate soluzioni di restauro e riqualificazione della floodplain, incentrate sostanzialmente in una gestione più consona delle aree di esondazione, rispetto alla naturale funzionalità dell'area stessa.

Allo stato attuale la previsione del rischio idrogeologico è contenuta nei PAI redatti da parte delle Autorità di Bacino (oggi Distretto di Bacino), più spesso in diversi Piani Stralcio successivi riguardanti solo talune zone facenti parte del Bacino di riferimento.

Detta previsione, quindi, si esplica mediante la costruzione di mappe di rischio in grado di evidenziare quali sono le aree del territorio soggette ai maggiori rischi di dissesto idrogeologico. Attraverso l'utilizzo della modellistica è possibile pertanto prevedere quali saranno le aree interessate da fenomeni di esondazione dopo aver assunto tutti gli elementi di input tra cui evidentemente la morfologia dei luoghi, l'uso del suolo e l'idrogramma di progetto che descrive l'evento di piena; l'output della modellistica è rappresentato appunto dalle mappe di allagabilità.

Per consentire l'applicazione della suddetta modellistica è necessario disporre degli input necessari tra cui la conoscenza della morfologia del bacino, sia a grande scala per l'applicazione dei modelli afflussi deflussi, sia a piccola scala per l'applicazione del modello idraulico nella zona di chiusura del bacino.

Tralasciando la variabilità e le differenti possibilità di applicazione dei modelli suddetti, la risoluzione e la precisione dei dati di input sono fattori che influenzano in maniera significativa l'affidabilità dei risultati della simulazione (Ozdemir et al. 2013).

In proposito anche Fewtrell (2011), che ha valutato due diversi modelli idraulici su un DTM (Digital Terrain Model) di risoluzione che varia da 0,5 a 5 m, conclude che la risoluzione dei dati ha un maggiore effetto sui risultati rispetto al modello utilizzato; ciò da risalto ulteriormente alla qualità dei dati ed alla accuratezza degli stessi al fine di pervenire ad un risultato affidabile.

Purtroppo, molto spesso questo dato può essere un elemento limitante nella realizzazione di simulazioni accurate in quanto difficilmente disponibile e comunque costoso da realizzare.

Il dominio di calcolo del modello può essere ricavato da diverse fonti. Già le basi informative disponibili on-line sovente forniscono un DTM a maglie di 20 m ed oltre, che può risultare poco idoneo all'utilizzo a seconda della conformazione del bacino e della tipicità dell'area considerata per la simulazione.

La cartografia ufficiale a curve di livello è un'alternativa alla carenza di accuratezza dei DTM ma impone comunque un'elaborazione ed il grado di affidabilità è comunque modesto tenuto conto della scala per cui tali carte sono state concepite.

Attualmente è predominante, se non esclusivo, l'utilizzo di dati LiDAR (Light Detection and Ranging) che possono raggiungere risoluzioni dell'ordine di 1 m o meno a seconda della zona. L'elemento pregiudizievole è la discontinuità della copertura che rende tale supporto non sempre applicabile. Infatti, frequentemente in indagini che coinvolgono aree interne, o comunque piccoli bacini, tale supporto non è disponibile ed è necessario procedere al rilievo di dettaglio attraverso l'utilizzo di strumenti di misura topografici.

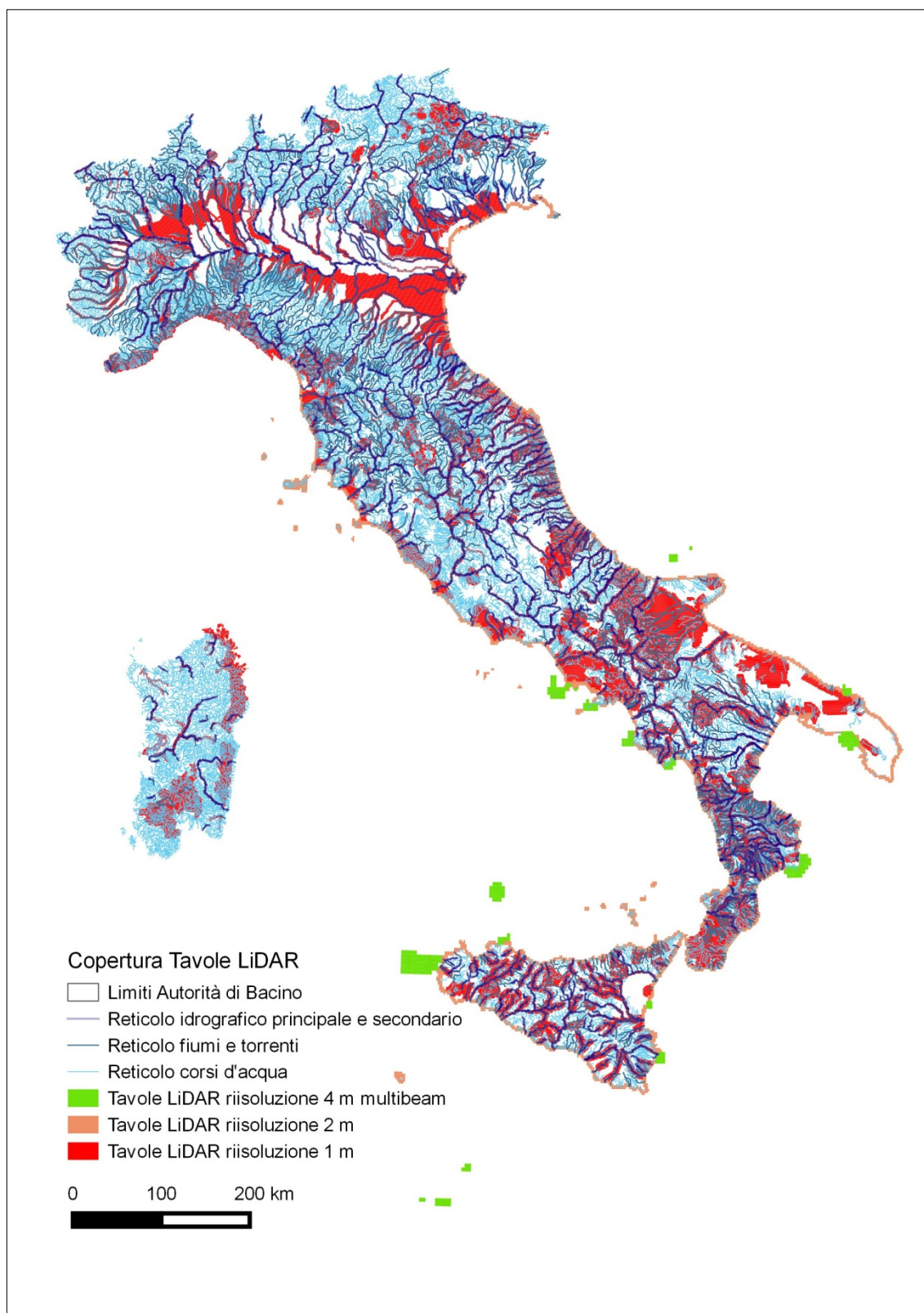


Figura 1.3 quadro d'unione delle tavole LiDAR e Reticolo idrografico. (Fonte: Portale Cartografico Nazionale – Servizio WFS)

La copertura del LiDAR è in prevalenza riferibile al Piano Straordinario di Telerilevamento ai dalla Legge n. 179/2002 (art. 27) che ha previsto un finanziamento

per la realizzazione del piano, volto alla verifica e al monitoraggio delle aree ad elevato rischio idrogeologico. In dettaglio il Piano ha previsto tre fasi di attuazione nella quale il rilievo LiDAR ha interessato dapprima il rilievo del reticolo principale e la fascia costiera (2008 - 2009). Le successive fasi, seconda (2010 - 2011) e terza (2013 – 2015), hanno ampliato la copertura in aree ad elevata criticità idrogeologica individuate dal tavolo tecnico Stato-Regioni ed in aree indicate dalle Autorità di Bacino, dalle Regioni e dalle Provincie Autonome, talvolta riguardanti ambiti del reticolo idrografico secondario.

Come si evince dalla Figura 1.3, l'area attualmente coperta dalle tavole LiDAR, seppur abbastanza estesa lascia ancora scoperte ampie aree, prevalentemente nelle zone interessate dal reticolo idrografico minore. In queste aree l'applicazione del rilevamento LiDAR è comunque difficile e piuttosto onerosa, essenzialmente dovuta al costo elevato della missione la quale deve coprire vaste aree per raggiungere un sufficiente livello di convenienza. Diversamente il rilevamento di aree frammentate e comunque caratterizzate da superfici modeste sarebbe estremamente oneroso.

Per questi motivi, nelle aree attualmente non coperte da rilevamento LiDAR, gli strumenti di pianificazione e di elaborazione modellistica si rifanno ai DTM dell'IGM ed alle Carte Tecniche Regionali, oltre a rilievi topografici di dettaglio nelle zone di maggior interesse.

Rientrano frequentemente in queste aree i bacini idrografici non strumentati e di piccole dimensioni, quest'ultimi non essendo trattati in maniera adeguata, rappresentano un "vuoto" per la normativa del nostro Paese.

Vengono definiti "piccoli" quando hanno un'estensione inferiore ai 150-200 Km², aspetto che li rende soggetti a tempi di risposta relativamente brevi ed imprevedibili, complicando così la gestione dei pre-allarmi nei confronti delle aree soggette ad esondazioni; vengono definiti invece "non strumentati" perché non sono sottoposti ad un monitoraggio in continuo, rendendo indisponibili dati riguardanti le serie storiche delle portate.

Questa grave lacuna non permette di tarare i modelli afflussi-deflussi, ovverosia dei modelli che a partire dalla pioggia (afflusso) simulano un fenomeno di portata in alveo (deflusso), utilizzati per l'elaborazione degli idrogrammi di progetto, impedendo così a sua volta la delineazione delle fasce di rischio prima citate.

1.1.3) Stato dell'arte sulla produzione delle mappe di allagabilità: DTM e modellistica idrologica/idraulica

Allo stato attuale la produzione di mappe di allagabilità prevede l'applicazione di modellistica idrologico/idraulica ad un territorio di cui sono noti gli elementi caratteristici di uso del suolo, presenza di infrastrutture ed altri elementi, ma soprattutto di cui è nota la morfologia.

L'acquisizione della morfologia o comunque della topografia veniva effettuata mediante rilievi in campo di sezioni fluviali con distanze dell'ordine di 400 metri, affiancate da poligonali e livellazioni a terra.

Un passo in avanti si è avuto con l'utilizzo di laser aviotrasportati (LiDAR) che consente l'acquisizione di una grande quantità di dati molto dettagliati in tempi relativamente brevi, seppur a fronte di costi piuttosto significativi.

Dalla consultazione delle principali Autorità di Bacino è possibile estrapolare le diverse metodologie utilizzate per ottenere il modello DTM; dalla visione di insieme sarà possibile evidenziare quali sono le procedure ormai consolidate che possono costituire in concreto il protocollo operativo.

A tale scopo sono state analizzate le metodologie adottate dalle seguenti Autorità di Bacino:

- ✓ Autorità di Bacino del Fiume Po
- ✓ Autorità di Bacino dell'Adige
- ✓ Autorità di Bacino del Fiume Tevere
- ✓ Autorità di Bacino dell'Arno
- ✓ Autorità di Bacino della Puglia
- ✓ Autorità di Bacino del Fiume Serchio

L'Autorità di Bacino del Fiume Po, nell'ambito del Progetto Esecutivo delle Attività realizzato in ottemperanza gli obblighi previsti dalla Direttiva Alluvioni, illustra nell'Allegato 2 (Gestione dati) alla Relazione Tecnica le fonti e le caratteristiche dei dati topografici e cartografici. Di seguito se ne riporta uno stralcio.

Dati Topografici

I dati topografici possono essere raggruppati nelle seguenti categorie principali:

- DTM realizzati con tecnica laserscanner dal MATTM nell'ambito del Piano di telerilevamento ambientale;

- rilievi topografici di sezioni trasversali dei corsi d'acqua;

- DTM realizzati con rilievi batimetrici continui della parte sommersa degli alvei fluviali

- ulteriori piani quotati o rilievi topografici locali.

Le attività principali da effettuare riguardano:

- la conversione dei dati nel sistema di riferimento;

- il confronto fra i DTM del Piano di telerilevamento ambientale e le sezioni trasversali al fine di verificare la corrispondenza dei sistemi di inquadramento topografico, la presenza e significatività della parte batimetrica, le eventuali differenze locali e le cause ad esse associate (vegetazione, ecc);

- l'organizzazione dei dati in formati facilmente esportabili ed utilizzabili nei software che saranno utilizzati per la mappatura della pericolosità;

- il trattamento del DTM e l'individuazione di Breakline significative, eventualmente necessari per la realizzazione di mesh di calcolo funzionali all'implementazione dei modelli idraulici bidimensionali su tratti significativi di asta fluviale.

Dati Cartografici

I dati cartografici riguardano le ortofoto, le foto aeree e le carte tecniche (CTR, CTP, ecc). Fra tali dati significativa importanza per le finalità di mappatura della pericolosità e del rischio assumono le recenti ortofoto AGEA 2008 che garantiscono una copertura omogenea sull'intero bacino e una buona corrispondenza temporale con il DTM derivante dai rilievi laserscanner del Piano di telerilevamento ambientale, essendo stati realizzati circa nello stesso periodo (2008 – 2009). Le attività principali da effettuare riguardano:

- la conversione dei dati nel sistema di riferimento;

- l'organizzazione dei dati in formati facilmente esportabili ed utilizzabili nei software che saranno utilizzati per la mappatura della pericolosità;

- la georeferenziazione di foto aree di significativo interesse, fra cui in particolare i voli post piena.

In relazione al punto 3, si tratta da una parte di organizzare l'accesso e la messa a disposizione dei dati utilizzati a chiunque sia interessato e dall'altra di definire le modalità di pubblicizzazione dei dati e degli elaborati significativi.

Anche per questo ultimo aspetto occorre tenere presente le direttive nazionali ed europee sull'accesso ai dati e sulla loro condivisione. In specifico occorre valutare la possibilità di pubblicare i dati su portali esistenti ovvero l'opportunità di costruzione di un portale di Distretto.

Allo stesso modo anche nell'Allegato 4 (Analisi idraulica sul reticolo idrografico principale) fornisce ulteriori elementi a riguardo.

3.1. Informazioni topografiche

Il rilievo topografico di riferimento su tutto il bacino del Po è il DTM dei Piani di telerilevamento nazionale del Ministero dell'Ambiente (di seguito DTM di riferimento). Pertanto esso

deve essere acquisito e ne devono essere raccolte le informazioni relative alle date dei voli di rilevamento lungo tutto il tratto di corso d'acqua in studio. Si deve tenere presente che il DTM di riferimento costituisce un patrimonio conoscitivo di grande valore, ma non è completo di tutte le informazioni necessarie per le valutazioni idrauliche. Infatti, la tecnica utilizzata non ha permesso il rilevamento delle quote delle parti dell'alveo inciso sommerse al momento del campionamento; inoltre non sono state fornite le ulteriori informazioni topografiche necessarie per caratterizzare gli elementi convenzionalmente non rappresentati nei DTM ma in grado di condizionare il deflusso (edifici ed infrastrutture non in terra, come manufatti idraulici di regolazione, ponti, muri di contenimento, ecc.). Pertanto, sia al fine di completare tali informazioni, sia al fine di valutare il grado di rispondenza delle analisi idrauliche pregresse alle attuali condizioni del corso d'acqua e del territorio connesso, devono essere raccolti gli altri più recenti rilievi disponibili in grado di caratterizzare geometricamente, mediante sezioni e profili, l'alveo inciso, le aree inondabili e tutte le opere idrauliche e le infrastrutture che determinano condizionamento al deflusso e all'espansione delle piene. Qualora opportuno, anche in relazione alle caratteristiche dei suddetti rilievi, si potranno acquisire anche i DSM del Ministero dell'Ambiente. Dei rilievi recenti disponibili devono essere acquisite le informazioni relative alle date di esecuzione e alla rete di inquadramento e di appoggio. Dei caposaldi utilizzati devono essere acquisite le monografie. Qualora esistano altri rilievi recenti solo per una parte del tratto di corso d'acqua oggetto di analisi, gli eventuali rilievi precedenti interessanti un più esteso tratto devono essere acquisiti anche per la parte coperta dal rilievo più recente, al fine di fornire elementi di confronto. Per le opere idrauliche o infrastrutturali in genere, in mancanza di dati di rilievo topografico, devono essere reperiti i progetti dei manufatti presso gli enti competenti. Qualora tale operazione risultasse particolarmente difficile od onerosa, devono almeno essere eseguiti rilievi speditivi mediante sopralluogo. Poiché la redazione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni deve essere basata sul DTM di riferimento, le sezioni topografiche relative agli altri rilievi devono essere oggetto di confronto con le sezioni estratte dal DTM di riferimento. Anche i piani quotati o i DTM relativi ad altri rilievi devono essere confrontati con il DTM di riferimento. In particolare, in caso di disponibilità di modelli numerici di simulazione del deflusso in piena, il confronto deve permettere di valutare il grado di corrispondenza tra i dati geometrici del modello e quelli ricavabili dal DTM di riferimento. Dei confronti suddetti deve essere fornita apposita descrizione nella relazione dell'attività corredata dai necessari elaborati grafici.

Elaborati di rappresentazione delle analisi:

- tabelle e grafici di confronto tra le diverse sezioni topografiche e tra i diversi DTM disponibili, in formato di testo e foglio elettronico,*
- cartografia di rappresentazione delle sezioni topografiche con elementi vettoriali in formato “shapefile”*
- DTM in formato sia “ASCII GRID” che “ESRI GRID”.*

Inoltre a titolo esemplificativo nell'allegato 5 (Mappatura della pericolosità) viene riportato un elenco indicativo degli studi e conoscenze disponibili e da utilizzare per la mappatura della pericolosità sul torrente Orco, affluente alpino del fiume Po in regione Piemonte.

- Cartografia
 - CTR Piemonte
 - CTP Provincia di Torino del 2006
- Rilievi topografici e DTM
 - DTM derivante da restituzione aerofotogrammetria del volo di magra del 2003 (Provincia Torino)
 - DTM derivante da restituzione aerofotogrammetria del 2006 connesso a CPT (Provincia Torino)
 - DTM derivante da rilievo laserscanner del 2008 (MATTM)
- Ortofoto e foto aeree
 - IT2000
 - Ortofoto magra 2003 e 2006 (Provincia di Torino)
 - Ortofoto 2008 (MATTM) e 2007/09 (AGEA)
 - Foto aeree evento piena 1993
 - Foto aeree evento di piena 2000
 - Foto aeree magra 2003
- Foto da terra e elicottero
 - Ricognizione da elicottero piena 2000 (AdbPo)
 - Ricognizione da elicottero 2004 (AiPo)
 - Dettagliate foto da terra sono disponibili nell'ambito degli studi della Regione Piemonte di cui ai punti successivi
- Catasto opere
 - Catasto opere disponibile nell'ambito degli studi della Regione Piemonte e di AIPO di cui ai punti successivi
- Documentazione eventi alluvionali
 - Cartografia degli eventi alluvionali del 1993 e del 2000 (Regione Piemonte)
- Programma di gestione dei sedimenti
 - Programma di gestione dei sedimenti del 2008 (AIPO – Politecnico di Torino, ART)
- Studi di asta
 - Studi per il monitoraggio e la manutenzione del torrente Orco del 2005 – 2006 (Regione Piemonte)
 - Politecnico di Torino, CNR IRPI)
- Modelli idraulici
 - Modello idraulico 1D dell'intera asta del tempo reale
 - Modelli idraulici locali 1D e 2D (ponte Alta velocità, ponte Autostrada Torino – Aosta, ecc.)

L'Autorità di Bacino dell'Adige, nella Relazione Illustrativa di sintesi dell'Individuazione e perimetrazione a rischio idraulico, da frana e da colata detritica del Piano Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico, riporta la metodologia di perimetrazione come di seguito riportato.

3.1.2 Perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica

Con la determinazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena caratterizzati da tempi di ritorno di 30, 100 e 200 anni è possibile effettuare la successiva trasformazione di tali portate in livelli idrici attesi, valutati attraverso l'utilizzo di un modello idrodinamico di propagazione delle piene a moto vario mono-bidimensionale, applicato lungo i corsi d'acqua principali del bacino. I risultati di queste elaborazioni sono riportati nella cartografia a scala 1 : 10.000 delle aree a diversa pericolosità idraulica.

Per quanto riguarda la metodologia per la perimetrazione delle aree allagabili si fa riferimento:

1. ai risultati ottenuti in relazione alla configurazione idraulica in alveo per effetto degli eventi di piena di 30.100 e 200 anni;
2. alla morfologia del piano di campagna nella regione prospiciente il corso d'acqua

Relativamente a questi due punti, il modello matematico di propagazione utilizzato ha consentito di effettuare simulazioni di eventi di piena accoppiando elementi monodimensionali, che schematizzano i corsi d'acqua, con elementi bidimensionali, cui corrispondono le superfici latitanti i corsi d'acqua in cui si spagliano le acque nel caso di sormonto arginale.

Le informazioni utilizzate nella modellazione, atte a descrivere con cura la morfologia del piano di campagna nella regione prospiciente il corso d'acqua e la geometria del corso d'acqua stesso, si possono così riassumere:

- piani quotati e sezioni del fondovalle del fiume Adige da Resia alla foce, frutto dei rilievi commissionati dalla Autorità di Bacino alla società C.S.R. (1998);
- risultati del rilievo laser altimetrico effettuato dalla Autorità di Bacino per quanto riguarda il fondovalle del fiume Adige tra Bolzano e la foce, il fondovalle del torrente Avisio da Fedaia alla foce e il fondovalle del torrente Travignolo da Forte Buso a Predazzo;
- risultati dei rilievi laser altimetrici in varie zone del bacino, effettuati nell'ambito dello studio per definire le fasce fluviali commissionato dall'Autorità di Bacino;
- Carta Tecnica Provinciale (per le provincie autonome di Bolzano e Trento) disponibile in formato raster e Carta Tecnica Regionale della Regione del Veneto disponibile in formato raster. Nell'itinere dell'approvazione si è resa disponibile anche la Carta Tecnica Regionale della Regione del Veneto in formato vettoriale, questo ha consentito di definire le aree con un maggiore grado di precisione nelle zone non coperte da rilievo laser altimetrico.

L'Autorità di Bacino del Fiume Tevere riporta gli elementi caratterizzanti la metodologia nella Sintesi del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico come riportato di seguito.

2.2 Valutazione della pericolosità e del rischio idraulico

Per quanto riguarda il rischio idraulico il reticolo idrografico è stato suddiviso in reticolo principale, secondario e minore. Sul reticolo principale sono state individuate le fasce di assetto

idraulico (fascia A, corrispondente ad un tempo di ritorno 50 anni, fascia B corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni e fascia C, corrispondente ad un tempo di ritorno 500 anni) e la disciplina relativa delle attività al loro interno compatibili e le aree a Rischio R4-molto elevato, R3-elevato ed R2-medio per le quali sono previsti disposizioni tecnico-normative che disciplinano l'uso delle aree a rischio, interventi strutturali di difesa idraulica e delocalizzazioni.

L'individuazione delle aree di pericolosità idraulica e delle zone di rischio lungo il reticolo principale derivano dall'applicazione di una procedura che utilizza tecnologie innovative per il rilievo della morfologia delle aree fluviali. In particolare l'intero corso del Tevere e dei suoi affluenti principali è stato oggetto di livellazioni di alta precisione delle sezioni d'alveo, spaziate mediamente da 200 a 400 metri, per un totale di 1800 sezioni su una lunghezza di reticolo di circa 700 km. Tutta l'area prospiciente il reticolo principale per circa 1450 Km² è stata inoltre rilevata con un laser altimetro aviotrasportato che ha prodotto un DEM di elevata precisione (passo 2 m, 20-30cm di errore in altezza). L'integrazione del DEM e delle livellazioni di precisione ha permesso una ricostruzione estremamente precisa della morfologia dell'ambiente fluviale e della batimetria. L'intera area indagata è stata integrata da una immagine multispettrale, elaborata nella banda del visibile, utilizzata per la costruzione di una carta aggiornata di uso del suolo. Su tale base sono stati mosaicati i Piani regolatori comunali con le relative destinazioni e previsioni urbanistiche. La procedura di individuazione della pericolosità idraulica, a partire dal quadro idrologico del bacino, ha utilizzato i codici HEC-RAS e FRESCURE per l'individuazione dei limiti delle aree allagabili con tempi di ritorno 50, 200, 500 anni.

Nell'ambito dei lavori del Piano di Gestione del Rischio per il bacino del Fiume Arno, viene fornita la metodologia adottata per la determinazione della mappe di pericolosità nella relazione di *“Stato di avanzamento del lavoro di definizione delle mappe di pericolosità e rischio per il bacino idrografico del Fiume Arno in applicazione della direttiva 2007/60/CE e del D.Lgs. 49/2010. - Piano di lavoro per il completamento delle attività”* del giugno 2012 di cui se ne riporta uno stralcio.

La modellazione svolta, i dati di base e la pericolosità idraulica nel bacino pilota

Il PAI individua, per tutto il bacino dell'Arno, la pericolosità idraulica. Tale pericolosità è definita su due livelli di approfondimento, storico-inventariale in scala 1:25.000, e su base analitica mediante modellazione idraulica in scala 1:10.000. Le classi individuate sono 4, da pericolosità moderata a molto elevata, distinte per tempi di ritorno (frequenza di accadimento) e, per la parte modellata nelle classi elevata e molto elevata, altresì in base al battente statico. La direttiva 2007/60/CE pone tra i requisiti per la definizione della pericolosità la frequenza di accadimento, consigliando di definire tre scenari di tempo di ritorno, indicando come sia facoltà degli enti individuati dagli Stati membri come unit of management, considerare anche altri parametri, tra i quali il battente correlato agli scenari considerati, la velocità dell'acqua, etc. Pone inoltre come fondamentale la considerazione degli scenari di cambiamento climatico.

L'insieme di questi elementi, al momento della definizione dell'approccio modellistico da utilizzare per la determinazione della pericolosità idraulica dell'Ombrone, è stato attentamente valutato al fine di individuare uno strumento che consentisse, nel transitorio, di rispondere ai requisiti del PAI vigente e, nelle fasi successive, di ottenere le risposte a quanto richiesto dalla 2007/60. Tutto ciò richiamando inoltre anche i requisiti minimi comuni che sono stati definiti alla scala di Distretto dell'Appennino Settentrionale, mediante l'attività di coordinamento svolta dall'AdB Arno. Nel successivo capitolo "La pericolosità idraulica e le mappe di rischio secondo la direttiva alluvioni" sono spiegate in dettaglio le questioni affrontate, relative alla definizione delle mappe di pericolosità e rischio ai sensi della direttiva. Ai fini di una corretta impostazione modellistica è estremamente importante la valutazione della consistenza dei dati di base. La risposta che può fornire l'applicazione di un modello si avvicina maggiormente alla possibile realtà quando, oltre alla qualità del modello utilizzato, si può contare su set di dati di base correttamente implementati e validati. Tra i dati di base fondamentali per la modellazione idrologica ed idraulica risultano prioritari i seguenti:

- *distribuzione e serie dei dati corrispondenti agli afflussi;*
- *distribuzione e serie dei dati corrispondenti ai deflussi;*
- *dettaglio del DTM e del DSM del terreno;*
- *distribuzione spaziale e temporale delle serie*
- *distribuzione e conoscenza delle singolarità idrauliche (ponti, traverse, sottopassi, opere idrauliche, portelle, connessioni, etc.).*

Per quanto riguarda la modellazione idrologica – ovvero la trasformazione da afflussi a deflussi - è oramai prassi comune fare riferimento, per quanto riguarda i bacini toscani, ad uno standard oramai affermato e consolidato quale il modello ALTO (Alluvioni in Toscana), sviluppato in collaborazione dalla Regione Toscana e l'Università di Firenze; tale modello fornisce la stima regionale per le portate di piena di tutti i corsi d'acqua toscani, fornendo i contributi idrologici in svariate sezioni del reticolo idrografico. Per quanto riguarda DTM e sezioni, invece, il fatto di avere dati recenti e di dettaglio costituisce il presupposto fondamentale per una corretta analisi di previsione dei fenomeni alluvionali. Per altro una delle voci di costo più elevate quando si va a realizzare cartografia di pericolosità e rischio idraulico è proprio quella relativa al rilevamento in campagna e relativa restituzione digitale di sezioni e rilievi. Per affrontare tale aspetto è stata innanzitutto valutata la consistenza spaziale dei rilievi esistenti, considerando come elemento prioritario la data di realizzazione. Sono stati quindi acquisiti i rilievi e le sezioni idrauliche realizzate da altri enti per scopi simili e sono stati confrontati sia tra loro, che con la cartografia digitale esistente (C.T.R. Regione Toscana) e il relativo "Sistema delle Acque" (una elaborazione realizzata da questa AdB in collaborazione con la Regione Toscana) che riporta in dettaglio in forma vettoriale tutte le informazioni di carattere idrografico, compreso il DTM maglia 10 x 10 m, ricavabili dalla CTR. Questa operazione ha presentato diversi lati non propriamente positivi, in quanto frequentemente i rilievi realizzati da enti diversi, in tempi diversi, hanno evidenziato difformità sia tra loro che con la CTR. In base a tale risultato è stato preso in considerazione un'altra possibilità, ovvero di utilizzare, sia ai fini della modellazione che della restituzione, i dati ricavabili dalle immagini LIDAR di recente acquisizione per tutto il bacino dell'Ombrone - ma di fatto disponibili per tutto il bacino dell'Arno tramite sia dati elaborati dalla Regione Toscana che dal Ministero dell'Ambiente (Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale) - . Da tali immagini, che hanno l'indubbio

vantaggio di avere dati omogenei per tutto il bacino, si può ricavare sia DTM che DSM a maglia 1 x 1 m, punti quotati, sezioni topografiche ed idrauliche secondo qualsiasi direzione possa interessare. Anche se a livello locale si possono, raramente, rilevare degli errori relativi di quota derivanti da particolari singolarità, la distribuzione omogenea e la possibilità di confronto e taratura diretta con capisaldi e sezioni di riferimento, rende il LIDAR uno strumento formidabile per l'utilizzo modellistico idraulico. Anche l'osservazione relativa al fatto che un segnale laser non può oltrepassare le superfici liquide, e quindi non risultano rilevabili i fondo alvei dei fiumi, viene superata mediante la considerazione che circa l'80% del reticolo idraulico superficiale dell'Ombrone rilevato dal LIDAR, e considerato per la modellazione, si presenta in stato di magra, con altezze del battente idraulico in alveo al massimo di qualche centimetro. In ogni caso per superare tale incertezza è stato effettuato il raccordo, per gli alvei geometricamente consistenti, con le sezioni esistenti al fine di ricostruire anche la porzione sotto battente.

Lo stralcio del Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della Puglia, nell'ambito della Relazione di Piano del Dicembre 2004, in merito al quadro conoscitivo riporta quanto di seguito.

L'individuazione e la perimetrazione delle aree soggette a pericolosità idraulica e geomorfologica (intese rispettivamente nel senso di aree inondabili e/o aree soggette ad allagamento ed aree interessate da movimenti di pendio) del territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia è stato attuato, in questa fase, sulla base delle informazioni storiche relative ad eventi calamitosi verificatisi in passato.

Il ricorso a tale criterio può considerarsi certamente utile ed irrinunciabile allorché non si dispone di studi idrologici estesi con lo stesso grado di dettaglio a tutto il territorio oggetto di studio. Ciò è ancora più vero nel caso dell'Autorità di Bacino della Puglia, il cui territorio risulta notevolmente esteso (circa 20.000 kmq) e caratterizzato da evidenti disomogeneità o differenze sostanziali nelle caratteristiche intrinseche dei reticoli idrografici e dei caratteri geomorfologici dei terreni costituenti le superfici di versante.

Il ricorso all'informazione storica quale strumento di riconoscimento delle aree caratterizzate da pericolosità idraulica e geomorfologica è altresì suggerito dalla normativa di riferimento in materia di difesa del suolo. Il D.P.C.M. 29 settembre 1998 "Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'articolo 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180" indica che le "Autorità di Bacino e le regioni potranno utilizzare, a corredo delle informazioni disponibili presso le loro strutture tecniche, reperibili in loco o raccolte con l'interpretazione geomorfologica delle osservazioni di campagna, delle foto aeree etc., le informazioni archiviate dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (GNDICI-CNR), nell'ambito del progetto Aree Vulnerate Italiane (AVI), i cui risultati sono presentati sinteticamente in rapporti regionali editi a cura del GNDICI-CNR" e disponibili on-line per la consultazione.

Per le finalità di elaborazione del Piano di Bacino Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del territorio di competenza dell'Autorità di bacino della Puglia, le fonti di informazione storiche che si sono rese disponibili e che sono state implementate sono:

- Banca dati Progetto AVI (Aree Vulnerate Italiane)
- Banca dati Progetto VAPI (Valutazione Piene)
- Banca dati Progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi Italiani)
- Piani Straordinari Interventi Urgenti (ai sensi della L. 267/98 e 226/99)
- Carta geologica d'Italia, in scala 1 : 100.000
- Studi territoriali di settore e documentazione tecnica prodotta da Amministrazioni locali.

.....omissis

Il complesso delle informazioni desunte dalle sopra accennate fonti è stato utilizzato per l'individuazione, all'interno del territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia, delle aree soggette a pericolosità idraulica e geomorfologica. L'implementazione e la trasposizione delle stesse in formato cartografico, al fine di giungere ad una rappresentazione grafica della distribuzione delle suddette aree, è stata realizzata per mezzo di elaboratori elettronici corredati di software del tipo "Geographic Information System". La base cartografica di riferimento utilizzata per le operazioni è stata la cartografia topografica IGMI in scala 1 : 25.000, georeferenziata nel sistema di riferimento cartografico UTM, WGS-84, fuso 33. Quale ausilio sono state utilizzate anche la cartografia IGMI in scala 1:50.000 e le ortofoto pancromatiche (volo AGEA 1997) e a colori (IT2000), quest'ultima limitatamente alle sole provincie di Foggia e Taranto.

Limitatamente ai Bacini Pilota dei Fiumi Lato e Lenne, l'analisi idraulica prevede il rilievo plano-altimetrico del reticolo idrografico principale come riportato di seguito.

VIII.5.1. Rilievo plano altimetrico del reticolo idrografico principale

E' stata realizzata dapprima una rete di inquadramento geodetico delle aste fluviali oggetto di studio, costituita da 33 punti fiduciari principali, materializzati e rilevati. Il rilievo dei capisaldi della rete è stato eseguito con tecnica GPS in modalità statica utilizzando come riferimento 3 capisaldi IGM presenti nella zona. Per ogni caposaldo è stata realizzata una monografia completa di planimetria di dettaglio e fotografie relative all'ubicazione del punto.

In una seconda fase è stato eseguito il rilievo topografico di dettaglio delle aste fluviali. In tale ambito è stato rilevato un totale di 423 sezioni trasversali dei corsi d'acqua, 134 sezioni nel bacino idrografico del fiume Lato e 299 nel bacino della Lama di Lenne.

.... Omissis.....

Successivamente, i dati planimetrici derivanti dal rilievo topografico di cui sopra sono stati integrati con i dati della Cartografia Tecnica Regionale (CTR) in scala 1 : 5.000 della zona. Cartografia che è stata di recente prodotta e messa a disposizione dell'Autorità di Bacino della Regione Puglia dalla Provincia di Taranto. Tale integrazione dei dati ha permesso di costruire un modello digitale del terreno (TIN), di grande dettaglio, della zona oggetto di studio. Modello digitale che è stato utilizzato, quindi,

come base per la predisposizione dei dati topografici da introdurre nel modello idraulico e nella interpretazione dei risultati ottenuti dallo stesso modello.

In particolare i dati derivanti dalla CTR sono stati utilizzati per estendere le sezioni rilevate topograficamente al di là del corso d'acqua fino a coprire l'intera zona alluvionale. Il tutto è stato eseguito in ambiente GIS, con il programma ArcView utilizzando le estensioni Spatial Analyst, 3D Analyst e GEO RAS, nello specifico quest'ultimo ha consentito la preparazione diretta dei dati da inserire nel programma utilizzato per la modellistica idraulica a partire dal modello digitale del terreno.

Nell'aggiornamento del Progetto di Piano del Luglio 2015, nella quale viene aggiornata la pianificazione di alcuni comuni della Provincia di Taranto e Lecce, gli studi morfologici vengono integrati con i rilievi Lidar forniti dal Ministero per l'Ambiente e Tutela del Territorio.

L'Autorità di Bacino del Fiume Serchio nella redazione della Variante al Piano di Bacino – Stralcio “Assetto Idrogeologico” dedica il paragrafo 2.3 alla descrizione dei dati topografici utilizzati come riportato di seguito.

2.3 Nuovi dati topografici

2.3.1 Il rilievo con tecnologia laser-scan (LiDAR)

L'Autorità di Bacino del fiume Serchio ha commissionato nel corso del 2006 un rilievo con tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) esteso su aree di pianura e di fondovalle per complessivi 30.000 ettari (figura 10) al fine di aggiornare il quadro conoscitivo topografico e geomorfologico del bacino.

Sono stati ottenuti i seguenti prodotti:

- modello digitale delle superfici (DSM)
- modello digitale delle superfici depurato dalla vegetazione (DTMI)
- modello digitale del terreno (DTM).

Tutti i prodotti sono disponibili con dimensione della cella pari a 1 m e sono restituiti sia nel sistema di riferimento UTM-WGS84 con altezze ellissoidiche sia nel sistema nazionale Gauss-Boaga con quote ortometriche. L'accuratezza attribuibile al dato altimetrico è stimabile in $\pm 20\text{cm}$ (funzione del tipo di sensore usato e delle quote di volo tenute). Il sensore laser utilizzato è in grado di inviare più di 30.000 impulsi al secondo, di fissare l'angolo di scansione in modo da massimizzare il numero di impulsi per unità di superficie al variare della quota di volo e di registrare contemporaneamente due risposte per ogni impulso emesso (primo ed ultimo impulso) con il relativo valore di intensità del segnale. Il primo impulso fornisce informazioni sulle parti sommitali degli oggetti mentre l'ultimo fornisce dati sul terreno anche in presenza di copertura vegetale. Integrati nello strumento ci sono un sensore inerziale ed un ricevitore GPS necessari per la determinazione dei parametri angolari dell'aeromobile e per l'orientamento nello spazio dei dati.

Particolare attenzione è stata posta al corretto inquadramento dei rilievi nel sistema WGS84 e, soprattutto, alla successiva trasformazione dei dati nel sistema cartografico UTM e Gauss-Boaga. Ciò al

fine di garantire la congruenza dei prodotti con la cartografia tecnica. A tale scopo è stata istituita, sull'area da rilevare, una rete GPS costituita da 38 capisaldi, di cui 10 appartenenti alla rete IGM95 e 28 di nuova istituzione (14 dei quali collegati a linee di livellazione IGM e pertanto di quota ortometrica nota).

La conformità dei prodotti forniti a quanto richiesto, in termini di rispetto dei parametri di precisione e accuratezza sia altimetrica che planimetrica, è stata verificata a posteriori attraverso il confronto con informazioni topografiche rilevate a terra. Le attività svolte a tale scopo sono state le seguenti:

- esecuzione di un rilievo topografico GPS di verifica su 15 aree-campione significative;*
- generazione di un modello digitale del terreno di verifica, con passo uguale a quello prodotto nell'ambito del servizio da collaudare (1m);*
- confronto statistico dei modelli digitali delle superfici e del terreno con quelli di verifica;*
- confronto delle coordinate planimetriche di elementi chiaramente riconoscibili sul rilievo LiDAR con elementi omologhi sul rilievo topografico (spigoli di edifici, discontinuità a terra, ecc).*

Dai risultati ottenuti in termini statistici si è riscontrata una ottima accuratezza dei modelli (in linea con quanto richiesto in sede di capitolato) per tutte le aree-campione rilevate.

I dati LiDAR sono stati utilizzati nei seguenti ambiti:

- modellazione idraulica*
- studi geomorfologici*
- monitoraggio di opere idrauliche e di interventi antropici (movimenti di terra, evoluzione e caratteristiche dell'edificato)*

Nell'ambito delle modellazioni idrauliche i dati LiDAR sono stati campionati per estrarne nuove sezioni trasversali dei corsi d'acqua da inserire nei modelli di simulazione monodimensionale dell'alveo: per tale tipo di applicazione l'abbondante informazione topografica contenuta nel LiDAR ha consentito di incrementare il grado di dettaglio di modelli già disponibili senza dover ricorrere a interpolazioni di dati noti (come si fa normalmente dovendo partire dai soli rilievi a terra o da quelli cartografici). L'informazione LiDAR deve comunque essere integrata, almeno parzialmente, da quella topografica tradizionale in corrispondenza delle parti d'alveo sommerse, dove il segnale laser non è in grado di riprodurre la batimetria.

I dati del rilievo hanno consentito anche la verifica e l'aggiornamento della geometria di alcune opere idrauliche recentemente realizzate o sottoposte a interventi di adeguamento (casce di laminazione su alcuni affluenti, adeguamenti arginali), nonché una caratterizzazione altimetrica ottimale, a scala di dettaglio, delle aree potenzialmente inondabili esterne agli alvei dei corsi d'acqua.

Per quanto riguarda la perimetrazione su base geomorfologica delle aree allagabili e dei principali elementi legati alla dinamica fluviale, i dati LiDAR, insieme alla fotointerpretazione di foto aeree acquisite contestualmente ai voli laser, hanno reso possibile uno studio esteso a tutti i tratti fluviali coperti da LiDAR, finalizzato a caratterizzare le aree in modellamento attivo e quelle di pertinenza fluviale.

2.3.2 Nuovo rilievo LiDAR 2010

In seguito ai numerosi eventi significativi di piena verificatisi nel periodo dicembre 2008-dicembre 2009, l'Autorità di Bacino ha ritenuto opportuno commissionare un nuovo rilievo LiDAR dell'asta principale del Serchio, finalizzato ad evidenziare e quantificare gli effetti degli eventi stessi sulle aree d'alveo e di pertinenza fluviale. Il rilievo ha coperto tutto il tratto del Serchio compreso tra la località Ponte di Campia e la foce per una lunghezza complessiva di circa 70km ed una superficie rilevata pari a 3500 ettari. I voli sono stati effettuati nel periodo marzo-aprile 2010. Durante lo svolgimento del lavoro erano ancora in corso lungo l'alveo del fiume alcuni interventi di somma urgenza attivati dalle diverse amministrazioni in seguito alle piene del dicembre 2009. Contemporaneamente ai voli LiDAR sono state effettuate anche riprese aeree con fotocamera digitale delle aree rilevate.

Lungo il medio corso del fiume è stata rilevata l'intera fascia di fondovalle mentre nel tratto arginato, a valle di Ponte a Moriano, sono stati rilevati l'alveo, le golene, gli argini ed una fascia estesa per 50 metri oltre il piede a campagna dei rilevati arginali. In corrispondenza delle zone delle rotture arginali (loc. Santa Maria a Colle in Comune di Lucca e Malaventre in Comune di Vecchiano) sono state rilevate anche le aree retrostanti i punti di rottura per valutare gli effetti dei fenomeni in termini di materiale alluvionale depositato.

La validazione dei nuovi dati LiDAR e il loro successivo confronto con i dati rilevati nel corso del 2006 (procedure attualmente in corso) potranno rendere possibili valutazioni quantitative di buon dettaglio in ordine alle tendenze evolutive a breve termine manifestate dal corso d'acqua.

2.3.3 Nuovi rilievi di corsi d'acqua

Negli anni successivi alla redazione del PAI vigente l'Autorità di Bacino ha curato l'integrazione e l'aggiornamento del quadro conoscitivo della geometria dei corsi d'acqua, sia affidando diversi incarichi per il rilievo di sezioni fluviali che raccogliendo lavori analoghi svolti da altri enti e soggetti.

I risultati di tali campagne di rilievo, di seguito riassunte, hanno arricchito e aggiornato il quadro conoscitivo pregresso e sono andate ad integrare in modo puntuale la nuova base dati Lidar precedentemente descritta, acquisita a scala di bacino.

Relativamente all'analisi idraulica, la metodologia viene riportata di seguito nel paragrafo 4.3.

4.3 Analisi idraulica

4.3.1 Ambito di studio e sintesi del lavoro

Le simulazioni idrauliche effettuate per il presente aggiornamento hanno interessato il reticolo riportato nella tabella seguente e visibile nella planimetria di figura 127.

..... omissis

Gran parte di tale reticolo era già stato analizzato in occasione degli studi connessi al vigente PAI. Tutti i tratti di studio nell'ambito del presente aggiornamento, nonché le aree di loro pertinenza o quelle da essi potenzialmente inondabili, rientrano nella copertura fornita del rilievo laser-scanning (LiDAR, Autorità di Bacino, 2006): l'aggiornamento della caratterizzazione geometrica degli alvei e delle aree di pertinenza fluviale è pertanto avvenuta integrando in modo critico le informazioni topografiche ricavate da:

- rilievi topografici pregressi (sezioni studio P.A.I. anno 2000 e precedenti);*

- modelli digitali del terreno LiDAR (2006);
- rilievi topografici recenti di sezioni fluviali, anche in corrispondenza di tratti fluviali oggetto di interventi recenti di mitigazione del rischio (vedi paragrafo 2.3.3).

Su corsi d'acqua con alveo ampio, non confinati e caratterizzati da scarsi battenti idrici (in particolare sull'asta principale del Serchio, nel suo medio corso non arginato) i modelli LiDAR forniscono una descrizione completa ed esaustiva della geometria del corso d'acqua.

In altri contesti (affluenti minori dei tratti interferenti con gli abitati, Serchio nel tratto arginato) il rilievo LiDAR è stato usato per integrare, verificare e/o aggiornare i dati topografici di rilievi già disponibili realizzati con tecniche tradizionali a terra.

L'integrazione delle diverse fonti ha permesso di incrementare in modo significativo l'accuratezza della ricostruzione geometrica dei corsi d'acqua rispetto alla base-dati preesistente del PAI.

Tutte le verifiche idrauliche sono state effettuate adottando modelli di simulazione con ipotesi di fondo fisso.

In linea con la analisi già svolte per il PAI vigente gli scenari ricostruiti comprendono eventi di piena con tempi di ritorno di 30 e 200 anni.

Per i tratti fluviali nei quali l'incidenza dei fenomeni di laminazione e di invaso è stata ritenuta trascurabile rispetto ai fenomeni di trasferimento cinematico è stato adottato lo schema di moto permanente monodimensionale. Tali tratti (aste identificate con i numeri 14÷22 nella tabella sopra riportata) comprendono sostanzialmente i principali affluenti della media valle per un reticolo complessivo di lunghezza pari a circa 35km e sono stati cimentati con le condizioni di massima portata al colmo ricostruite dall'analisi idrologica.

Per il sistema idraulico maggiore (asta del Serchio e affluenti rigurgitati, affluenti arginati del basso corso, indicati con numeri 1÷13 in tabella) è stato invece necessario ricostruire in modo completo la propagazione delle onde di piena di progetto nonché le dinamiche esondative nei diversi tratti arginati ed è stato pertanto adottato uno schema di moto vario quasi-bidimensionale. Tale schema associa al modello idraulico non stazionario dell'alveo una rappresentazione "a celle di accumulo" (storage areas) delle aree inondabili adiacenti il corso d'acqua, opportunamente delimitate e connesse idraulicamente all'alveo. L'individuazione e la caratterizzazione topografica di tali celle (nel seguito definite Aree di Potenziale Esondazione, oppure A.P.E.) è stata condotta sulla base dell'informazione topografica LiDAR.

La lunghezza di reticolo complessivamente simulata secondo tale schema ammonta a circa 127 km.

Il set degli eventi di piena simulati comprende scenari idrologici con durate di pioggia variabili, in funzione dei diversi sistemi analizzati, nel range compreso tra 1 e 24 ore, in modo da riprodurre e considerare l'involuppo degli eventi critici per ogni tronco simulato sia dal punto di vista delle portate al colmo che dei volumi di deflusso.

Alla luce di quanto sopra riportato all'interno degli elaborati redatti dalle principali Autorità di Bacino Italiane, si possono riconoscere elementi comuni alle metodologie. In primo

luogo, tenuto conto del significativo onere che comportano i rilevamenti in campo, vengono dapprima acquisiti i dati in disponibilità di altri Enti, Comuni, Provincie, etc .. che a vario titolo hanno realizzato rilievi, inventari etc .. anche per altre finalità. Vengono spesso utilizzati anche dati aereo-fotogrammetrici di recente realizzazione, utilizzati per la creazione di carte Provinciali.

L'elemento critico dell'acquisizione di tali dati è rappresentato sostanzialmente dalla disomogeneità dei dati e dalla parziale copertura del territorio. Inoltre anche l'epoca di rilievo può essere limitante; il verificarsi di un evento calamitoso può indurre modifiche anche significative alla morfologia dei luoghi rendendo i rilievi precedenti non del tutto corretti.

Ad integrazione dei dati topografici rilevati e comunque disponibili, quasi sempre viene previsto l'utilizzo del LiDAR, realizzato nel Piano di Telerilevamento Ambientale dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare o da altre campagne di rilevamento svolte dalle Autorità stesse nell'ambito del processo di pianificazione.

La risoluzione spaziale del LiDAR, generalmente 1 o 2 metri, costituisce certamente una base estremamente affidabile per l'applicazione dei modelli idrologici ed idraulici; tuttavia l'integrazione con i dati topografici può fornire ulteriori indicazioni circa la presenza di elementi ed opere che non possono essere sufficientemente dettagliate con il DTM ma che viceversa possono avere una rilevante influenza nella simulazione, è il caso di edifici ed infrastrutture non in terra, come manufatti idraulici di regolazione, ponti, muri di contenimento, ecc.).

In ambiti non coperti dalle basi LiDAR vengono solitamente utilizzate le carte IGMI o Carte Regionali, caratterizzati chiaramente da una minor risoluzione spaziale del dato altimetrico. Solitamente la morfologia in alveo viene reperita da indagini in campo e da rilevamenti diretti, in quanto le peculiarità del rilievo LiDAR non consentono di acquisire la morfologia al di sotto del livello idrico.

In conclusione la generalità delle metodologie adottate prevede l'integrazione di un DTM proveniente da LiDAR con misure derivanti da rilevamenti topografici di dettaglio; il tutto affiancato ad ortofoto aeree per avere una chiara lettura del territorio. In questi casi, rappresentanti la maggioranza, può talvolta essere limitante la risoluzione temporale dei dati; i costi di rilevamento talvolta non consentono campagne di acquisizione molto frequenti con la conseguenza che un DTM venga adottato per un periodo lungo oltre all'effettiva validità dello stesso, per il sopraggiungere di modificazioni indotte da eventi di piena o comunque da dinamiche di sviluppo e cambio d'uso del suolo.

1.2) DETERMINAZIONE DELLA MAPPA DI ALLAGABILITA' TRAMITE RILIEVO TOPOGRAFICO TRADIZIONALE E DA DRONE: SCOPO DELLA TESI

Nell'ultimo decennio l'evoluzione delle tecnologie utilizzate per il rilevamento e la restituzione della morfologia del terreno hanno avuto una significativa trasformazione. La diffusione delle stazioni totali (Keim et al., 1999; Fuller et al., 2003) come anche dei sistemi GPS differenziali (Brasington et al., 2000) hanno notevolmente incoraggiato anche la diffusione e lo sviluppo delle tecniche di telerilevamento.

Importanti avanzamenti in termini di superficie coperta, risoluzione e precisione dei modelli di elevazione del terreno (DTM) si sono verificati con l'utilizzo di Laser Scanner aviotrasportati ed a terra (Lohani et al, 2001; Rosser et al., 2005; Heritage et al, 2007; Jones et al., 2007; Hodge et al., 2009; Notebaert et al., 2009) e con la fotogrammetria digitale (Lane et al., 2000; Westaway et al., 2000; Brasington et al, 2003).

Infine si registra una significativa diffusione dell'utilizzo di piattaforme leggere, caratterizzate da costi estremamente contenuti, costituiti da UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (Lejot et al, 2007; Niethammer et al., 2012) nonché aquiloni e dirigibili (Marzolff et al., 2003; Boike et al, 2003; Smith et al., 2009; Vericat et al., 2009), i quali vengono equipaggiati con sensori, generalmente per l'acquisizione di immagini.

In questo senso gli UAV sono uno strumento promettente per la raccolta di dati geografici e possono essere applicati a diversi ambiti come la gestione delle risorse naturali, ecologia del territorio ed ingegneria civile (Shahbazi et al, 2014) (Anderson et al, 2013) (Liu et al, 2014).

La diffusione della fotogrammetria da UAV può rappresentare un'alternativa all'acquisizione di dati topografici con elevata accuratezza come ad esempio il LiDAR. L'argomento è stato già trattato più volte in passato (Baltsavias 1999; Leberl et al 2010; Strecha et al 2011), tuttavia poche sono le applicazioni in ambito idraulico finalizzate all'applicazione di modelli continui di propagazione dell'onda di piena.

Chiaramente anche gli UAV non sono esenti da limitazioni come il modesto payload, inteso come carico utile trasportabile destinato al sensore ed alla strumentazione necessaria all'attivazione e controllo dello stesso, una regolamentazione ancora in fase di definizione; tuttavia gli investimenti e l'interesse generale hanno dato

slancio all'industria che sta compiendo importanti progressi su numerosi fronti (Colomina e Molina 2014).

Obiettivo del presente lavoro è quello di estrarre un DTM dall'elaborazione fotogrammetrica di immagini acquisite con UAV, da utilizzare in alternativa al DTM LiDAR nella modellazione idraulica bidimensionale per la determinazione delle mappe di allagabilità.

Il connubio tra UAV e fotogrammetria cosiddetta dei vicini (Close Range), in quanto volta al rilievo di oggetti vicini contrariamente alla fotogrammetria terrestre, ha di fatto aperto nuovi scenari applicativi soprattutto dove le risorse per lo studio e la pianificazione idraulica sono limitate.

In tali contesti, perlopiù in riferimento a piccoli bacini ed aree a tutt'oggi non coperte da rilievi accurati, l'utilizzo di UAV e le tecniche fotogrammetriche possono fornire un valido supporto al fine di colmare tali carenze e consentire l'applicazione dei modelli matematici di previsione, posti alla base di una pianificazione e gestione moderna del bacino idrografico.

La configurazione che si intende adottare, di seguito meglio descritta, può rappresentare la soluzione ideale anche per allargare le possibili applicazioni in ambito di ricerca e soprattutto in aree remote o inaccessibili (Westoby M.J.,2012).

Pertanto l'obiettivo è quello di verificare se la ricostruzione topografica realizzata con l'utilizzo di strumentazione a basso costo sia sufficientemente accurata ed affidabile da essere alternativa al consolidato LiDAR esclusivamente nell'ambito della modellazione idraulica finalizzata alla determinazione delle mappe di allagabilità.

In tal senso l'attenzione è rivolta essenzialmente alle zone di floodplain allagabili che rappresentano l'elemento su cui possono essere apprezzati i vantaggi maggiori dell'applicazione della tecnica.

Per quanto concerne invece la determinazione delle dimensioni dell'alveo e della sua conformazione, quest'ultima deve essere ricavata dal rilievo topografico, anche in considerazione della presenza praticamente costante di elementi, acqua e vegetazione in particolar modo, che ostacolano la ricostruzione dei DTM, sia per il metodo fotogrammetrico, sia dal rilievo LiDAR.

2) MATERIALI E METODI

2.1) DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO: “PIAN DI MAIERE”

L’area di studio doveva necessariamente rispettare due condizioni contemporaneamente e precisamente:

- doveva essere disponibile il rilievo LiDAR con il quale effettuare il confronto del DTM ricostruito con tecniche fotogrammetriche ed approccio SfM (Structure from Motion),
- all’interno dell’area dovevano essere reperibili elementi del reticolo idrografico su cui effettuare la simulazione idraulica; pertanto aree potenzialmente inondabili in prossimità della chiusura del bacino del corpo idrico considerato.

Un’area che potenzialmente poteva rispondere a tali requisiti è stata individuata a sud-est dell’abitato di Tuscania in corrispondenza della località “Pian di Maiere”. Si tratta di un’area che sotto il profilo idraulico è caratterizzata dalla chiusura del bacino del Fosso del Maschiolo che confluisce nel Fiume Marta.

L’area di interesse è chiaramente quella immediatamente a monte del punto di chiusura; il fosso ha un andamento NO-SE e percorre la mezzeria di una fascia pianeggiante che si snoda tra due rilievi principali; il primo a NE in località Pian di Mola con quote massime attorno ai 190 m s.l.m., ed il secondo in direzione SO in località S. Pietro con quote massime attorno ai 180 m s.l.m.

La floodplain del Fosso del Maschiolo indicata come area di studio si estende per una superficie di circa 17 Ha, mentre il corpo idrico nel tratto interessato ha una lunghezza di circa 400 metri.

Nel tratto interessato la floodplain passa da una quota di circa 116 m s.l.m., in corrispondenza dell’attraversamento della Strada di S. Angelo, sino ai 109 m s.l.m. immediatamente a valle della confluenza con il Fiume Marta.

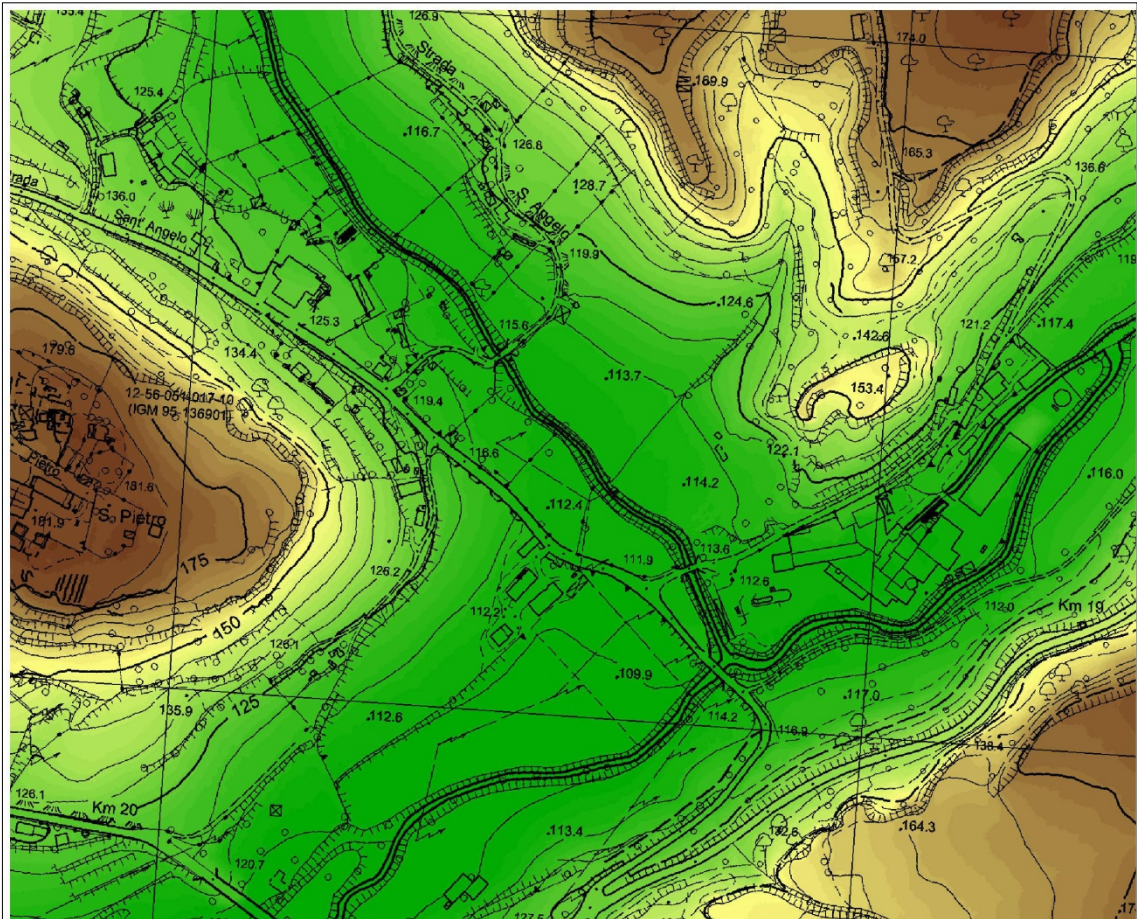


Figura 2.1 illustrazione della morfologia dell'area di studio.

L'area in esame evidenzia la presenza di diversi elementi che possono assumere rilevanza nella fase di estrazione del DTM ed anche successivamente nella fase di simulazione idraulica.

In particolare, per quanto concerne la ricostruzione topografica, si rileva la presenza di aree caratterizzate da vegetazione bassa e talvolta rada, rappresentata da coltivi, aree incolte e le pertinenze delle edificazioni. Viceversa nelle zone prossime ai corpi idrici la vegetazione si fa più fitta e vigorosa, arricchita da numerosi alberature di salici e pioppi, tanto da nascondere per gran parte il terreno sottostante e le sponde dell'alveo. In aggiunta sono presenti diversi manufatti sparsi ed un ampio insediamento industriale, collegati da una viabilità asfaltata.



Figura 2.2 illustrazione dell'area di studio, in blu sono indicati i corpi idrici di interesse, da NO-SE il Fosso del Maschiolo, affluente di destra del Fiume Marta, in rosso la viabilità esistente.

In conseguenza del contesto variegato, la gamma cromatica che caratterizza le texture delle immagini è piuttosto ampia, inoltre anche le tipologie rilevabili, intese come complessità delle geometrie e rugosità delle superfici, sono abbastanza variegate e complesse, da ciò potranno essere ricavate diverse considerazioni sull'accuratezza della ricostruzione rispetto alle diverse situazioni locali ed ai diversi elementi geometrici.

In merito agli elementi propriamente riconducibili alla simulazione idraulica, ciò che rileva essenzialmente è la presenza di manufatti in corrispondenza dell'alveo, in dettaglio due attraversamenti che possono costituire ostacolo al deflusso delle acque soprattutto nel caso di simulazioni con elevato tempo di ritorno in cui l'esondazione può assumere una portata considerevole in floodplain; allo stesso modo anche la viabilità limitrofa può avere ripercussioni sulla simulazione.

2.2) DTM TRADIZIONALI PER LA MODELLISTICA IDRAULICA: *LiDAR*

In generale la base dati utilizzata per la realizzazione delle simulazioni idrauliche e per gli studi connessi è rappresentata dal DTM LiDAR realizzato nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento previsto dalla Legge n. 179/2002, come peraltro emerge dalle Relazioni Tecniche di P.A.I. delle Principali Autorità di Bacino riportate nel paragrafo 1.1.3.

La tecnica LiDAR (con questo nome ci si riferisce anche al dato generato) si basa sull'utilizzo di un telemetro laser che può essere aviotrasportato, in questo caso il sensore è corredato da un sistema GPS (Global Positioning System) e da un dispositivo inerziale. Il sensore invia a terra un impulso e determina la posizione dell'oggetto o della superficie colpita in funzione del tempo di ritorno impiegato dall'impulso. Lo strumento riesce generalmente ad acquisire diversi impulsi di ritorno, nella fase di post processing è pertanto possibile distinguere ad esempio il terreno dalla vegetazione sovrastante.

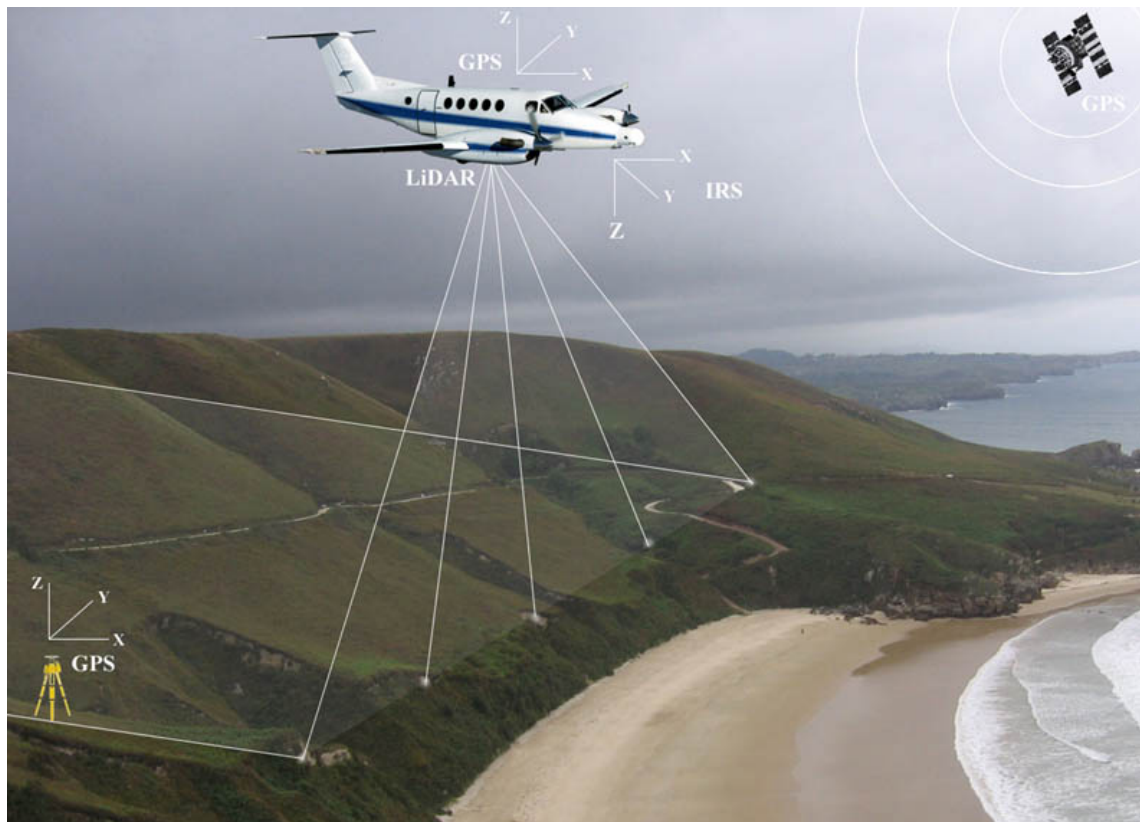


Figura 2.3 illustrazione schematica del rilievo effettuato con laser aviotrasportato

Tale tematismo è un elemento comune a gran parte degli enti di pianificazione come si prefiggeva il Piano stesso il quale, come riportato nel Disciplinare Tecnico del maggio 2013 (Fornitura di dati, sistemi e servizi per il potenziamento del sistema informativo del piano straordinario di telerilevamento ambientale (PST – A) aveva l’obiettivo di *“generare e rendere disponibili e condivisibili, all’intero comparto della Pubblica Amministrazione, informazioni relative alla morfologia dei territori indispensabili e soprattutto propedeutiche per la realizzazione di elaborati ad alto valore aggiunto finalizzati al supporto dei processi decisionali e di quelli operativi”*, ed inoltre disponeva che *“I singoli dati acquisiti e l’accesso alla banca dati saranno resi disponibili alle diverse amministrazioni al fine di supportare: attività di prevenzione e di predizione nelle aree classificate e/o classificabili a elevato rischio di dissesto idrogeologico così come individuate negli strumenti di pianificazione di bacino (PAI). Le basi dati realizzate rappresenteranno un valido contributo alle attività di governo del territorio, supportando in particolare le attività di topografia, cartografia e fotogrammetria numerica, la modellistica tridimensionale, i Sistemi Informativi Territoriali e, soprattutto, i Sistemi Informativi di Supporto alle decisioni”*.

La risoluzione è certamente uno degli aspetti più significativi delle peculiarità del DSM (Digital Surface Model) derivato dal rilievo LiDAR. Nell’ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) si hanno risoluzioni che vanno da qualche metro sino a meno di 1 metro. Una significativa porzione del rilievo, tra cui l’area oggetto di studio, è stata acquisita con risoluzione pari ad 1 m. Conseguentemente anche il DTM derivante avrà la medesima risoluzione in quanto ricavato dal filtraggio del modello digitale delle superfici DSM – Last Pulse (ultimo echo dell’impulso laser) eliminando, sia con algoritmi automatici che manualmente dall’operatore, tutti gli oggetti (es. edifici, coperture arboree, vegetazione, pali, cavi, ecc.) che non riguardano il solo modello plano-altimetrico della superficie terrestre.

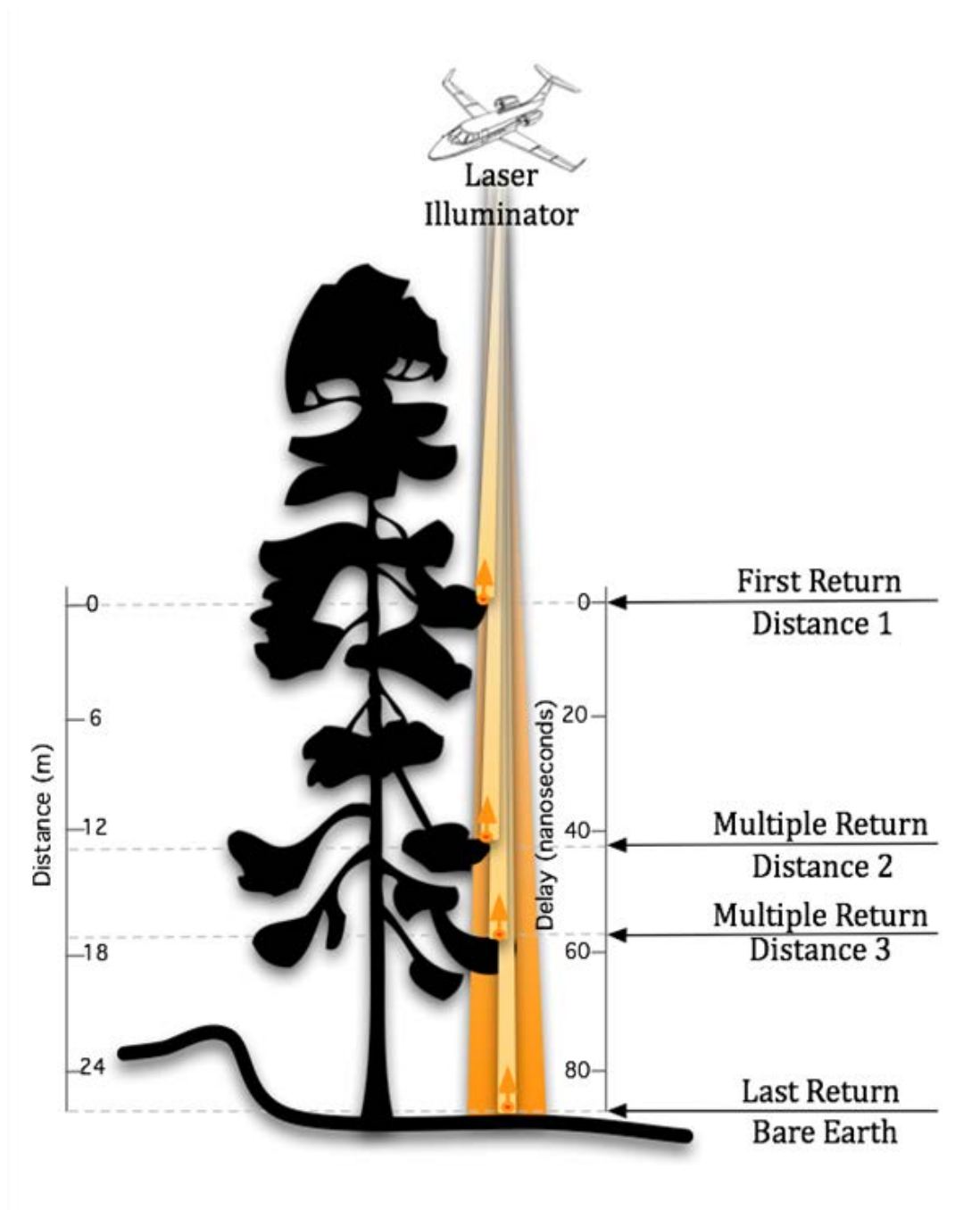


Figura 2.4 illustrazione schematica degli impulsi di ritorno che identificano elementi aventi diversa altezza.

L'area di indagine è stata rilevata nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) in quanto prossima al Fiume Marta. Nel tratto in esame il rilevamento ha una risoluzione di 1 m e come si evince dalla consultazione del quadro d'unione disponibile sul Geoportale Nazionale; il rilievo di detta zona è stato collaudato in data 08/05/2011.

Nell'ambito del presente lavoro, si assume il livello DTM LiDAR quale riferimento su cui effettuare la comparazione e valutare il grado di accuratezza del DTM derivato da UAV.

2.3) DTM INNOVATIVI: RICOSTRUZIONE TRAMITE UAV

Il potenziale fotogrammetrico dei UAV è stato ampiamente valutato in diversi studi (Gulch, 2011; Haala et al 2011.; Küng et al, 2011.; Vallet et al, 2011.; Rosnell e Honkavaara, 2012; Barry e Coakley, 2013)

I principali vantaggi di questa tecnica sono:

- i costi hardware relativamente bassi;
- l'elevata automazione del rilievo fotografico ed il costo di gestione molto basso pertanto applicabile anche a rilevamenti poco estesi
- elevata ripetibilità del rilievo con costi contenuti;
- restituzione di ortofoto con alta risoluzione tenuto conto della vicinanza dell'oggetto inquadrato,
- possibilità di disporre sul terreno punti di controllo a terra (GCP) al momento della rilevazione;
- possibilità di visualizzazione in campo i dati acquisiti consentendo la ripetizione in caso di errori nella rilevazione;
- rischi per la sicurezza molto bassi in caso di incidente, a causa del peso modesto di questi dispositivi;
- veloce pianificazione della missione che permette l'esecuzione del rilievo in modo rapido ad esempio subito dopo una calamità naturale.

Chiaramente possono essere riconosciuti anche alcuni svantaggi rispetto alla fotogrammetria tradizionale come ad esempio la superficie limitata di rilevamento dipendente dall'autonomia del UAV e la mancanza nella maggior parte dei casi di sensori che consentono la georeferenziazione diretta delle immagini in maniera accurata. (Gonçalves e Henriques. 2015), seppur quest'ultimo elemento sia superabile con l'acquisto di mezzi adeguati o con la georeferenziazione indiretta.

2.3.1) Scelta della piattaforma e del sensore

Gli UAV presentano significativi vantaggi in termini di flessibilità e costi contenuti se paragonati ai sistemi di acquisizione convenzionale realizzata con aerei. Generalmente lo sviluppo di un UAV da utilizzare per la fotogrammetria inizia con la scelta della piattaforma e dei sensori compatibili con la stessa.

Il payload, l'autonomia di volo, la semplicità di pilotaggio sono gli elementi che maggiormente vengono considerati nella scelta della piattaforma. Talvolta possono essere utilizzati sistemi RTF (Ready to fly) come ad esempio AscTec Falcon8 (Anai et al, 2012), Aeryon Scout (Bahr et al, 2013), SenseFly eBee (Boccardo et al, 2014). Chiaramente tali sistemi possono offrire una facilità di utilizzo maggiore, talvolta a scapito di una gestione maggiormente personalizzata del sensore, sia nel controllo che nella scelta.



Figura 2.5 il modello SenseFly eBee è uno dei modelli più diffusi utilizzato per la fotogrammetria

Le prove condotte nell'ambito del presente studio hanno voluto focalizzare l'attenzione sull'utilizzo di UAV assemblati RTF dal costo estremamente contenuto e

facilmente pilotabili, sia in modalità manuale, sia in modalità automatica con l'impostazione di waypoint. Solitamente tali dispositivi sono già ottimizzati e configurati per essere utilizzati in abbinamento ad action cam proprietarie che di fatto stanno assumendo la connotazione di un prodotto standard.

Tale scelta è risultata in accordo con le finalità di applicazione della tecnica fotogrammetrica in ambiti geografici non completamente o del tutto scoperti da rilevamenti LiDAR o topografici di dettaglio, tali da poter essere convenientemente utilizzati nell'elaborazione dei modelli previsionali per la determinazione delle mappe di allagabilità.

La scelta della piattaforma e della tipologia di sensore, vincola necessariamente le fasi successive di acquisizione ed elaborazione delle immagini; come ad esempio le procedure per la determinazione dell'orientamento esterno delle immagini stesse.

La scelta di un sistema di navigazione avanzato può svolgere due ruoli contemporaneamente; oltre a consentire il volo automatico è in grado di determinare l'orientamento esterno delle immagini senza utilizzare punti di controllo a terra, realizzando una georeferenziazione diretta (Turner et al, 2014)

L'accuratezza della georeferenziazione diretta dipende dalle performance del sistema di navigazione e dalla calibrazione della piattaforma inerziale; in funzione della velocità di volo, della affidabilità delle misure, del ritardo tra lo scatto e l'attribuzione delle coordinate all'immagine, possono evidenziarsi gravi errori di posizionamento (Chiang et al, 2015)

Diversamente, negli altri casi la georeferenziazione delle immagini è indiretta e si basa sul riconoscimento di punti di controllo a terra (GCP). Dalla localizzazione dei punti, dalla configurazione degli stessi dipende chiaramente l'accuratezza finale della georeferenziazione indiretta (Ai et al, 2015) (Wu et al, 2013)

Seppur la georeferenziazione diretta delle immagini possa rappresentare una soluzione maggiormente speditiva, ciò implica l'utilizzo di dispositivi molto accurati e conseguentemente anche costosi che esula dal contesto applicativo a cui si riferisce lo studio.

Dovendo pertanto utilizzare un UAV dal costo contenuto con possibilità di pianificazione della missione, la scelta è ricaduta sul DJI Phantom 2. Il Phantom 2 è un piccolo quadricottero estremamente diffuso soprattutto in ambito ludico che si caratterizza per una semplicità di utilizzo eccezionale ed una buona affidabilità dovuta

all'elettronica proprietaria della DJI che rappresenta uno dei principali produttori mondiali.

2.3.2) Descrizione del UAV, delle apparecchiature e delle configurazioni

Il Phantom 2 viene fornito interamente assemblato e pronto al volo; tuttavia per essere utilizzato ai fini del rilievo fotogrammetrico è necessario dotare il quadricottero di ulteriori dispositivi che non compaiono nella configurazione originale, ma che sono sostanzialmente accessori già predisposti per l'assemblaggio anche da personale non qualificato.



Figura 2.6 immagine del quadricottero Phantom 2 della DJI utilizzato per le prove di acquisizione fotogrammetrica

Il Phantom 2 è equipaggiato con elettronica NAZA MV2 dotata di accelerometro, giroscopio, barometro e GPS. Questi sensori consentono al quadricottero di essere pilotato in maniera semplice. In questa configurazione il Phantom 2 può mantenere la posizione di hovering utilizzando i sensori per bilanciare l'assetto ed il GPS per mantenere la posizione nello spazio; mentre il barometro aiuta il GPS a mantenere la quota; per tale motivo il produttore dichiara un'accuratezza di hovering orizzontale di 2,5 m e verticale di 0,8 m.

Le altre caratteristiche tecniche dichiarate dal produttore sono riportate nella tabella sottostante.

Tipologia	Quadricottero RTF (Ready to Fly)
Autonomia	25 min volo e Smart Battery
Sicurezza	Ritorno automatico a casa e atterraggio automatico in caso di avaria
Peso / Massimo al decollo	1000 g / $\leq$ 1300 g
Accuratezza hovering	Verticale: 0.8m; Orizzontale: 2.5m
Frequenza radiocmando	2.4GHz ISM
Supporti Gimbal	Predisposto per Zenmuse H3-2D e H3-3D
Espansione del sistema	Modulo di espansione CAN-Bus Supporto per trasmissione a terra live

Tabella 2.1 Caratteristiche tecniche del quadricottero utilizzato

Il sistema RTF originale viene ampliato e supportato da altri dispositivi per consentire la ripresa e l'acquisizione delle immagini e precisamente:

1. Gimbal Zenmuse H3-2D
2. Mini iOSD
3. Trasmettitore video
4. Groud Station
5. DJI Datalink

Il Gimbal Zenmuse H3-2D è uno stabilizzatore per la camera perfettamente supportato con l'elettronica. Grazie all'integrazione con l'elettronica di bordo, il gimbal reagisce ai cambiamenti di assetto del UAV mantenendo stabile l'inquadratura della camera. Questo è reso possibile dal lavoro di 3 motori brushless che si muovono in maniera automatica; nel caso in esame il gimbal stabilizza su due assi annullando l'effetto di beccheggio e rollio.

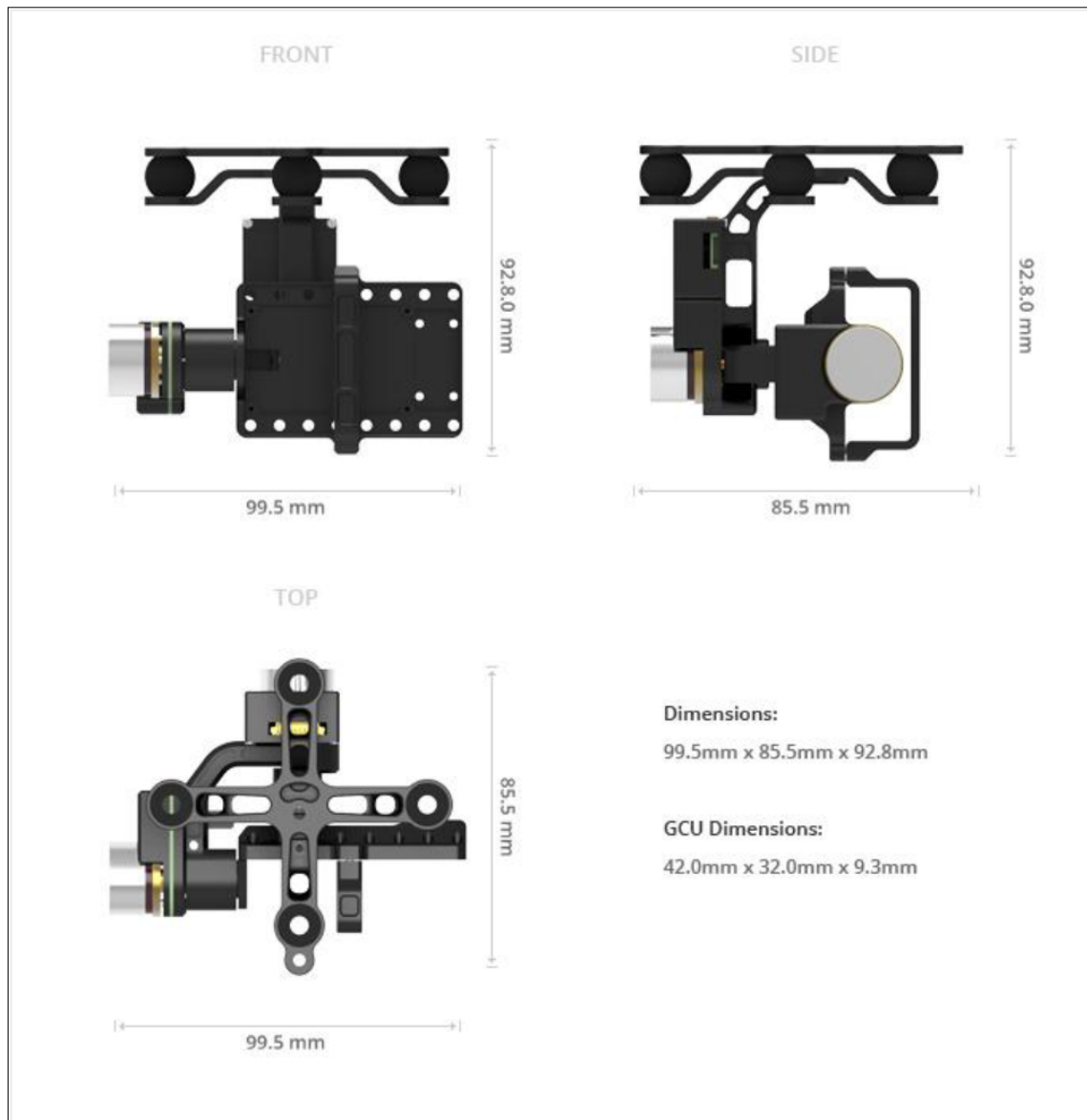


Figura 2.7 particolare delle dimensioni del gimball adottato

Il Phantom 2 nella configurazione con Gimbal Zenmuse H3-2D è predisposto per l'acquisizione con fotocamera GoPro 3+ black edition.

La camera ha una lunghezza focale da 14 a 28 mm (equivalenti 35 mm) in relazione al FOV impostato, la risoluzione massima è di 12 mp (4000 x 3000 pixel) con un sensore di 1/2,3" (Larghezza 6,16 mm – Altezza 4,6 mm) e grandezza del pixel pari a 1,55µm.

Caratteristica principale che contraddistingue la camera è l'ottica estremamente larga che produce un effetto fisheye sulle foto scattate; tale caratteristica, come si vedrà in seguito, non può essere eliminata del tutto seppur indesiderata per l'utilizzo fotogrammetrico. Nell'ambito della scelta della strumentazione da utilizzare, questa

caratteristica può essere considerata tra le più limitanti, tuttavia nell'esperienza in oggetto è stata privilegiata la semplicità di utilizzo del mezzo e la configurazione dello stesso. Coerentemente con quanto riportato nelle pagine precedenti, ciò si contrappone all'utilizzo di una camera maggiormente performante che tuttavia avrebbe richiesto un payload maggiore.



Figura 2.8 particolare della videocamera compatta utilizzata

Per le finalità del rilievo fotogrammetrico è importante che la camera sia dotata della funzione time-laps che consente lo scatto programmato delle immagini ad intervalli di tempo regolari reimpostati. Il modello utilizzato dispone della funzione time-laps e può utilizzare diversi intervalli a scelta tra: 0,5,1,2,5,10,30 e 60 secondi.

Il dispositivo iOSD (information On Screen Display) consente di visualizzare nel monitor della Ground Station i dati telemetrici in tempo reale quali:

- Carica delle batterie di bordo
- Distanza verticale ed orizzontale dal punto di decollo (Home point)
- Modalità di pilotaggio
- Angolo di beccheggio e di rollio
- Velocità di avanzamento in orizzontale e verticale

- Numero di GPS collegati

Il trasmettitore video, collegato alla camera ed all'elettronica di bordo, trasmette l'inquadratura della camera in tempo reale alla Ground Station. In quest'ultima saranno pertanto visibili i dati telemetrici rilevati dalla Mini iOSD sullo sfondo dell'immagine ripresa dalla camera.

La Ground Station comprende il ricevitore video, collegato via radio al dispositivo montato su UAV ed un monitor in cui viene riprodotto ciò che viene inviato dal trasmettitore.

L'esecuzione del volo finalizzato al rilievo fotogrammetrico richiede inoltre che il UAV sia dotato di un dispositivo atto al caricamento della missione nella centralina autopilota (Fly Control), nel caso in oggetto tale dispositivo è il DJI Datalink. Quest'ultimo, collegato ad un pc, trasmette tutti i dati necessari all'esecuzione della missione e precisamente le coordinate dei waypoint e le velocità di avanzamento, salita e discesa del UAV.

Attraverso il software di gestione è possibile programmare fino a 16 punti waypoint impostando preventivamente le traiettorie e le quote di sorvolo.

2.3.3) Fotogrammetrica close-range

La ricostruzione tridimensionale di un oggetto oppure della superficie del terreno nel caso di processamento di immagini aeree, avviene utilizzando tecniche fotogrammetriche che nella fattispecie di acquisizione tramite UAV viene detta close-range in virtù della quota modesta che solitamente caratterizza i punti di presa; in contrapposizione come accennato precedentemente all'acquisizione da satelliti o sensori aviotrasportati, che invece rientrano nella fotogrammetria terrestre.

L'utilizzo della fotogrammetria close-range per la modellazione tridimensionale, era già uno strumento ampiamente utilizzato come emerge dalla letteratura (Remondino e El-Hakim, 2006; Matthews, 2008; Fraser e Cronk, 2009), recentemente lo sviluppo e l'ottimizzazione degli algoritmi in grado di estrarre la morfologia del terreno partendo dalle triangolazioni di coppie di immagini digitali sovrapposte, hanno migliorato sensibilmente la qualità dei dati (Chandler, 1999;. Lane et al, 2000).

Congiuntamente anche il basso costo e la migliore qualità delle fotocamere reflex e compatte, nonché i procedimenti di calibrazione applicabili a queste camere non

metriche (Clarke e Fryer, 1998; Chandler et al, 2005;. Remondino e Fraser, 2006) hanno contribuito alla diffusione della tecnica nei più svariati impieghi.

In letteratura ritroviamo esempi di monitoraggio degli alvei (Lane, 2000;. Chandler et al, 2002; Brasington e Smart, 2003; Bird et al, 2010), degli argini (Barker et al, 1997;. Pyle et al, 1997), dei canali (Betts e DeRose, 1999; Marzolf e Poesen, 2009) e dei ghiacciai (Baltsavias et al, 2001;. Keutterling e Thomas, 2006).

Anche in ambito geologico sono diverse le applicazioni (Krosley et al, 2006;. Sturznegger e Stead, 2009) che includono anche l'analisi di stabilità dei versanti rocciosi (Haneberg, 2008). Infine non sono mancati diversi esempi di fotogrammetria close-range applicati alla quantificazione diretta dell'erosione del suolo (Stojic et al, 1998; Lane et al. 2001; Rieke-Zapp e Nearing, 2005; Heng et al., 2010).

La tecnica di estrazione del DTM dalle immagini digitali sfrutta l'approccio detto "Structur from Motion". Studiata negli anni '90, la tecnica SfM ha origine nello studio della Computer Vision (Spetsakis e Aloimonos, 1991; Boufama et al, 1993;. Szeliski e Kang, 1994) e nello sviluppo di algoritmi di funzioni corrispondenti del decennio precedente (Forstner, 1986; Harris e Stephens, 1988).

Recentemente l'approccio è stato reso popolare attraverso la diffusione di pacchetti software realizzati ad hoc come anche soluzioni cloud di elaborazione che comunque sfruttano i principi SfM (Snavely et al, 2008).

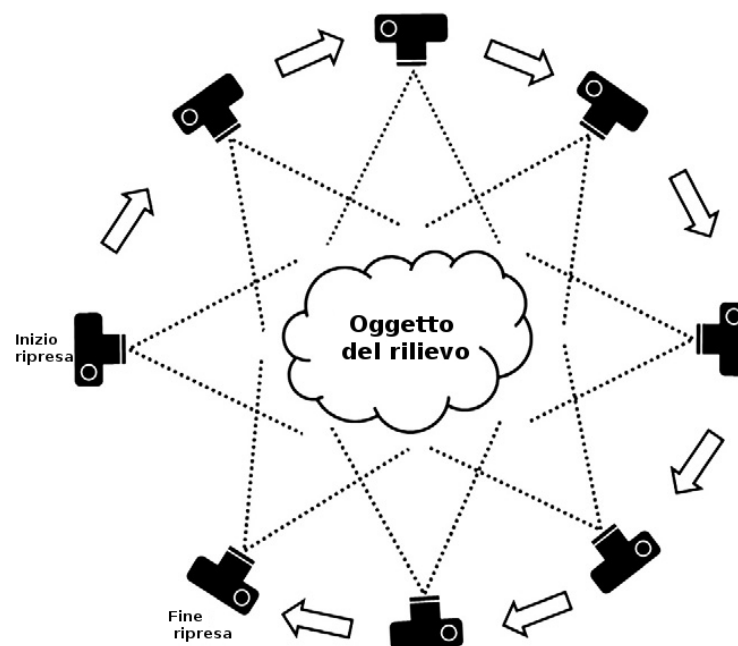


Figura 2.9 illustrazione del principio di presa su cui si basa la tecnica Structure-from-Motion (SfM)

SfM si basa sugli stessi principi della tecnica fotogrammetrica stereoscopica tradizionale, secondo la quale la struttura tridimensionale di un oggetto può essere determinata con l'utilizzo di immagini sovrapposte riprese da diversi punti di vista.

La differenza sostanziale risiede nel fatto che l'approccio SfM determina automaticamente l'orientamento interno ed esterno della presa fotografica, senza bisogno di una rete di punti di cui sono note le coordinate. Ciò è reso possibile attraverso una procedura iterativa e ridondante di regolazione del blocco fotografico, basata su un database di caratteristiche (descrittori) estratte automaticamente dalle immagini sovrapposte (Snavely, 2008).



Figura 2.10 illustrazione di un fotogramma, in alto sono indicati solo i GCP rilevati, sotto vengono aggiunti i descrittori per l'allineamento delle immagini

Più in dettaglio, nella fotogrammetria digitale tradizionale, la posizione nello spazio di un oggetto o di un punto, richiede la conoscenza delle coordinate e la posizione della camera nel momento di acquisizione, in alternativa possono essere utilizzati una serie di punti di controllo ripresi nella scena. Nel primo caso, in assenza di un gruppo di acquisizione di immagini dotato di GPS e bussola elettronica, la geometria della scena viene ricostruita mediante triangolazione. Diversamente nel secondo caso i punti di controllo devono essere identificati manualmente nelle immagini, questo consente di stimare la posizione della camera.

Nell'approccio SfM, la geometria della scena e la posizione della camera vengono risolti simultaneamente attraverso l'identificazione dei descrittori specifici rappresentati nelle immagini in input. La verifica di questi descrittori da un'immagine all'altra consente una prima stima della posizione del punto di presa nonché una ricostruzione degli oggetti inquadrati che viene migliorata ed ottimizzata iterativamente minimizzando gli scarti quadratici.

Proprio per l'assenza di punti di coordinate note, nell'approccio SfM la ricostruzione degli oggetti e la stessa geometria della scena inclusa la posizione della camera, non hanno un orientamento ed una scala. Conseguentemente anche la nuvola di punti generata non sarà riferita ad un sistema di coordinate nello spazio, bensì dovrà essere georiferita ad un sistema di riferimento assoluto. Ciò può essere realizzato eseguendo un allineamento tridimensionale utilizzando un piccolo numero di punti noti (GCP), riconoscibili nelle immagini e di cui si conosce con sufficiente precisione la posizione nel sistema di riferimento voluto.

Tali GCP possono convenientemente essere scelti successivamente all'elaborazione in maniera tale da poter utilizzare punti che siano accessibili con strumenti di rilievo, ad esempio GPS, e soprattutto facilmente riconoscibili nella nuvola di punti generata. E' utile indicare punti con elevato contrasto, anche utilizzando marker realizzati ad hoc e posizionati all'interno della scena ripresa, magari in maniera regolare su tutta l'area.

L'approccio SfM, per come concepito, richiede di fatto un'elevata sovrapposizione delle immagini acquisite riprese da punti di vista differenti, tali da mostrare tutta la struttura tridimensionale dell'oggetto che si vuole ricostruire, oppure immagini derivate da un sensore in movimento come suggerisce il nome.

Per tale motivo, l'approccio SfM è quello che meglio si adatta alle caratteristiche delle immagini acquisite da UAV, nel quale non è difficile avere serie fotografiche con elevato grado di sovrapposizione sia longitudinale sia laterale con punti di vista che muovono lungo traiettorie eventualmente anche predefinite.

2.3.4) Pacchetto software di processamento delle immagini

Diversi sono i software fotogrammetrici in grado di elaborare le immagini acquisite da UAV, tuttavia il veloce diffondersi dei mezzi a costi contenuti ha suscitato un grande interesse anche da parte di altre aziende che hanno sviluppato nuovi pacchetti software ottimizzati e comunque dedicati all'elaborazione delle immagini ottenute da UAV, basati sostanzialmente su tecniche di computer vision.

Nella maggior parte dei software realizzati per l'elaborazione delle immagini da UAV, viene utilizzato l'approccio chiamato "structure from motion" (Snavely et al., 2007). Sono disponibili sia pacchetti gratuiti e open-source, come ad esempio Bundler e CMVS (Furukawa e Ponce, 2010), Apero e Mic-Mac (Deseilligny e Clery, 2011) e EyeDEA (Roncella et al., 2011). Negli ultimi anni (Remondino et al., 2012) sono stati implementati anche altri prodotti commerciali (Photomodeler, Pix4UAV, Agisoft PhotoScan, etc.) che possono vantare anche un'interfaccia grafica maggiormente accessibile per l'utente meno esperto.

L'elaborazione delle immagini acquisite per il caso di studio è stata eseguita con un software commerciale e precisamente Agisoft Photoscan. Il software si basa su una tecnica di ricostruzione multi-view, ed è essenzialmente un procedimento automatico (Agisoft. 2012).

Il workflow del software si articola in passaggi successivi che devono necessariamente essere eseguiti in sequenza; l'utente può personalizzare alcuni parametri di elaborazione oppure mantenere le impostazioni di default. Questa facilitazione consente l'elaborazione anche da personale con modeste competenze in ambito fotogrammetrico.

Gli algoritmi di processamento delle immagini sono chiaramente riservati, tuttavia i passaggi in cui si articola il workflow sono abbastanza comprensibili e sono da ritenersi oramai consolidati ed adottati da diverse software house.

Il workflow prevede nella prima fase la lettura dei parametri di orientamento interno, e precisamente la dimensione del sensore e la distanza focale, sulla base dei dati riportati negli attributi EXIF delle immagini acquisite.

Questi valori vengono utilizzati per agevolare la ricerca di punti di collegamento tra i vari fotogrammi determinando una corrispondenza caratteristica. Questo procedimento è simile all'approccio noto come SIFT (Scale-invariant feature transform) (Lowe, 2004); tuttavia nel pacchetto Photoscan vengono utilizzati algoritmi diversi per migliorare la qualità dell'allineamento (Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015.).

I punti corrispondenti che mostrano un errore significativo vengono scartati con il metodo dei minimi quadrati; inoltre anche l'utente ha la possibilità di specificare eventualmente una soglia inferiore per ottimizzare l'allineamento e ridurre i punti incerti.

Nel caso il sensore o il UAV utilizzato abbiano la possibilità di effettuare la registrazione della posizione GPS in concomitanza dell'acquisizione dell'immagine, tale valore seppur approssimativo, è utile per ricostruire il blocco di immagini e ricercare i punti di collegamento, inoltre fornisce anche una georeferenziazione del blocco seppur approssimativa e conseguentemente della nuvola di punti generata.

La nuvola di punti costituisce già un modello tridimensionale dell'oggetto rilevato, la sua georeferenziazione, qualora non siano disponibili i dati GPS del UAV, viene effettuata attraverso l'utilizzo di GCP (Ground Control Point) riconoscibili sulle immagini acquisite e di cui generalmente sono note le coordinate geografiche, rilevate con sistemi GPS. Anche nel caso di utilizzo dei dati GPS del UAV o del sensore, sarà necessario utilizzare ugualmente punti GCP per migliorare la precisione dell'allineamento che altrimenti sarebbe eccessivamente approssimativo.

Attraverso i GCP le immagini acquisiscono l'orientamento esterno assoluto necessario per il successivo processamento delle immagini e della nuvola di punti.

Il riconoscimento dei GCP sulle singole immagini è manuale, pertanto l'utente deve prestare la massima attenzione ad evitare errori di stima e comunque posizionamenti approssimativi dei marker in corrispondenza dei GCP a terra.

Nella seconda fase un algoritmo rigoroso risolve le equazioni di collinearità per determinare le posizioni approssimative dei punti di presa e li affina successivamente utilizzando un algoritmo di regolazione bundle, simile al noto Bundler.

In questa fase vengono calcolati i parametri di calibrazione della camera secondo il modello Brown considerando i seguenti termini:

- f - lunghezza focale,
- C_x, C_y - coordinate punto principale,
- K_1, K_2, K_3 - distorsione radiale coefficienti del polinomio,
- P_1, P_2 - coefficienti di distorsione tangenziali.

A scelta dell'utente possono essere utilizzati anche altri parametri e precisamente:

- coefficiente radiale di 4 ° grado, K_4 ,
- un fattore di scala dell'immagine y , rappresentata da due diverse distanze focali, f_x e f_y , e un coefficiente asimmetrico tra l'asse x e l'asse y .

Ottenuto l'orientamento interno dell'immagine ed affinato mediante i procedimenti di cui sopra, viene ricostruita la nuvola di punti (Dense cloude) basata su diversi algoritmi, con un approccio multi-view per la ricostruzione rapida.

Nelle fasi successive viene realizzato dapprima il solido e successivamente la mesh a triangoli che generalmente viene semplificata in quanto la generazione a partire dal solido produce un numero di vertici significativamente eccedentario, il numero realmente necessario alla accurata descrizione della morfologia dell'oggetto rilevato.

A seguire viene generato il modello raster DSM interpolando la maglia mesh; chiaramente la dimensione delle celle costituenti il DSM è funzione della dimensione del GSD (Ground Sampling Distance) che a sua volta dipende dalle caratteristiche della camera e dalla quota di volo secondo l'equazione:

$$GSD = \frac{Z * d_{pixel}}{c}$$

Dove:

Z rappresenta la quota di volo,

d_{pixel} rappresenta la dimensione del pixel

c indica la distanza focale

mentre la dimensione a terra del fotogramma conseguentemente sarà:

$$L(h) = GSD * h \text{ pixel}$$

Il DSM viene infine utilizzato per l'ortorettifica dell'immagine aerea; entrambi i raster possono essere esportati in formato GeoTIFF georeferenziati in relazione alle coordinate indicate nei GCP; il software riconosce i sistemi di coordinate secondo i codici EPSG contenuti nella libreria open source Proj4.

2.3.5) Pianificazione della missione

Stabilita l'area di indagine è possibile procedere alla pianificazione della missione determinando il percorso, o meglio la rotta che il UAV dovrà percorrere per effettuare la giusta acquisizione delle immagini.

Preliminarmente alla fase di pianificazione della missione è necessario effettuare un sopralluogo per valutare il contesto dell'area di rilievo; ciò è reso necessario oltretutto anche in considerazione dell'evoluzione recente della normativa in vigore, la quale prevede onerosi adempimenti in termini di sicurezza del volo ed autorizzazione all'esecuzione di sorvoli in aree critiche. Diversamente in aree non critiche è sufficiente una dichiarazione da parte dell'operatore responsabile delle operazioni.

Sempre in considerazione al contesto è opportuno valutare la presenza di ostacoli che possono creare problematiche all'avanzamento del UAV, come anche al decollo ed all'atterraggio. Quindi sarà necessario stabilire quali sono i potenziali punti dove posizionare la Ground Station ed effettuare il controllo delle operazioni, inclusi il decollo e l'atterraggio.

La scelta deve anche considerare oltremodo la distanza tra il punto di decollo/atterraggio, salvo i casi in cui questi punti non coincidono, e l'area propriamente di acquisizione; tenuto conto della limitata autonomia dei UAV tale distanza dovrebbe esser ridotta il più possibile, al più anche indicando il punto di partenza e di arrivo della missione all'interno dell'area di rilievo.

Ciò premesso, tutti i dati tecnici della missione devono essere determinati a priori in quanto sia la quota di volo, sia la velocità di avanzamento e sia la sovrapposizione laterale e frontale delle immagini acquisite, devono essere opportunamente ponderate al fine di prevedere quello che sarà il photoset finale.

Solitamente è ragionevole ipotizzare preliminarmente una quota di volo media che tenuto conto delle caratteristiche del sensore, possa restituire un GSD di dimensioni opportune per le finalità del rilievo.

Stabilita la quota di volo può essere determinata esattamente la rotta che il UAV deve seguire raggiungendo waypoint successivi sino al termine della missione. Dalla distanza tra i waypoint e conseguentemente dal percorso che segue il UAV dipende il grado di sovrapposizione laterale che i blocchi di immagini avranno al momento dell'elaborazione; considerando che generalmente il lato corto del sensore è parallelo alla linea di percorrenza.

Stabilita la rotta, il grado di sovrapposizione frontale viene governato intervenendo sulla velocità di avanzamento orizzontale del UAV e sul time-laps della camera, in pratica l'intervallo di tempo tra una acquisizione e la successiva. All'aumentare della velocità deve ridursi il tempo intercorrente due acquisizioni successive.



Figura 2.11 illustrazione della missione programmata, nell'immagine sono indicati i waypoint utilizzati per l'acquisizione

E' importante ricordare che tutto il procedimento di orientamento esterno delle immagini si basa sulla sovrapposizione delle immagini ed oltremodo l'approccio SfM già descritto richiede ridondanza dei descrittori estratti, o meglio dei punti chiave, tra immagini consecutive.

Conseguentemente maggiore sarà la sovrapposizione, maggiore è la presenza di punti chiave e la ridondanza degli stessi sulla sequenza di foto; da ciò chiaramente prescinde anche l'accuratezza della ricostruzione topografica del modello tridimensionale e del DTM finale.

Tuttavia occorre tener presente che non necessariamente tutte le foto acquisite debbono essere processate, questo potrebbe comportare un aggravio di tempo di lavoro e risorse di calcolo eccessive oltretutto inutili. Pertanto se da un lato è ragionevole effettuare una campagna di acquisizione sovrabbondante, dall'altra occorre tener presente che ciò potrebbe comportare un aggravio nella fase di elaborazione, al più anche per effettuare uno screening e scartare le immagini non idonee.

2.3.6) Dati tecnici della missione

Tenuto conto dell'estensione dell'area di studio ed in considerazione della dimensione del GSD richiesto per l'applicazione del caso di studio, si è scelto di effettuare un sorvolo dell'area indicata con una quota media riferita al punto di decollo di 100 metri.

Tale quota di volo può consentire l'acquisizione di immagini con GSD pari a:

$$GSD = \frac{100 \text{ m} * 1,55 \text{ } \mu\text{m}}{2,77 \text{ mm}} = 0,056 \text{ m}$$

Dove $1,55 \text{ } \mu\text{m}$ è la dimensione del pixel per il sensore utilizzato e $2,77 \text{ mm}$ è la distanza focale.

La dimensione del pixel a terra sarà orientativamente di 5,6 cm.

La rotta definita dai waypoint è lunga circa 1,4 Km e percorre in senso longitudinale entrambe le sponde del Fosso del Maschiolo prima e del Fiume Marta dopo. L'area ricoperta comprende pertanto la parte terminale del corso del Fosso del Maschiolo ed un tratto del Fiume Marta a valle della confluenza, limitatamente alla parte sulla destra idrografica che per la sua orografia poteva essere utile rilevare ai fini della simulazione.

La velocità di avanzamento, considerando il grado di sovrapposizione voluto e la quota stabilita, è stata impostata ad un valore di 5 m/s. Ipotizzando un GSD di 5,6 cm ed una dimensione del fotogramma pari a 2560×1920 pixel, otteniamo una dimensione a terra di circa 143×107 metri, senza considerare l'orientamento esterno e la deformazione del fotogramma.

Immaginando di voler ottenere una sovrapposizione orizzontale del 90% tra un fotogramma ed il successivo, si dovrà stabilire una velocità ed un time-lapse che garantisca due acquisizioni successive nell'arco di tempo che il UAV percorre la distanza di circa 14 m.

La velocità massima del UAV dichiarata è di 15 m/s, tuttavia più frequentemente le velocità di avanzamento, anche avuto riguardo della possibile presenza di vento contrario, sono comprese tra 5 e 10 m/s. Da ciò si deduce che ragionevolmente impostando una velocità di 7 m/s si può ottenere la sovrapposizione voluta con time-lapse di circa 2 secondi.

Per il caso di studio, in via precauzionale, la velocità di avanzamento del UAV è stata impostata a 5 m/s e l'intervallo di time-lapse è stato di 2 secondi. Ciò ha consentito l'acquisizione sovrabbondante di fotogrammi in maniera da garantire una buona sovrapposizione anche nel caso di cattiva acquisizione di taluni fotogrammi.

La missione ha avuto una durata di circa 8 minuti ed ha consentito l'acquisizione di oltre 230 immagini. Chiaramente il numero di immagini che verranno utilizzate per la ricostruzione saranno solo una parte; verranno escluse le immagini di decollo ed atterraggio che non aggiungono elementi utili alla ricostruzione.

Nella prova non è stata impostata alcuna variazione dell'assetto della camera che pertanto è stata mantenuta in posizione nadirale dal gimball per tutta la missione, limitando le variazioni di assetto che il UAV ha dovuto effettuare per raggiungere i waypoint e per correggere eventuali variazioni di assetto dovute al vento.

Relativamente all'impostazioni di acquisizione delle immagini, tenuto conto del caratteristico obiettivo fisheye della camera, si è optato per il FOV più stretto (impostazione 5 Mpixel) con una risoluzione nominale di 2560 x 1920 pixel.

2.3.7) Rilievo dei punti di controllo (GCP)

Come illustrato nei paragrafi precedenti, la ricostruzione del modello seguendo l'approccio SfM necessita di punti di controllo a terra tramite i quali il software riesce a determinare l'orientamento interno ed esterno delle immagini, stimando contemporaneamente la posizione del punto di presa.

Il rilievo dei punti può essere realizzato sia durante che dopo la fase di acquisizione delle immagini. Possono essere pertanto utilizzati elementi mobili disposti all'interno dell'area di indagine prima dello svolgimento della missione, oppure possono essere utilizzati elementi fisici immobili presenti nella scena, comunque facilmente distinguibili nelle immagini acquisite.

Per il caso di studio sono stati disposti nell'area di indagine 8 marker ad elevato contrasto e di dimensioni adeguate, successivamente rilevati con GPS Modello Leica SR20. L'ubicazione dei marker ha interessato esclusivamente aree direttamente

accessibili; trattandosi di terreni e proprietà essenzialmente private, non è stato possibile adottare una distribuzione maggiormente omogenea e regolare. Piuttosto si è cercato di utilizzare punti visibili da tutte le angolazioni aeree riponendo particolare attenzione agli elementi antropici che caratterizzano la scena e possono avere influenza nella successiva simulazione idraulica.

I punti rilevati verranno utilizzati all'intero del software come Ground Control Point di coordinate note X, Y. Diversamente la quota altimetrica desunta dal rilievo GPS non può essere utilizzata in quanto rappresenta la quota ellissoidica nel punto considerato. Pertanto al valore altimetrico del GPS viene sostituito il valore corrispondente del rilievo LiDAR, con il quale si intende verificare la corrispondenza delle zone ricostruite.



Figura 2.12 illustrazione della disposizione dei marker all'interno dell'area di studio

2.3.8) Processamento immagini

Il processamento delle immagini è stato realizzato con un pacchetto software commerciale distribuito dalla Agisoft denominato Photoscan Professional Version 1.2.

Il workflow generale del pacchetto software, come riportato nel manuale utente (Agisoft, 2015) è articolato nelle seguenti fasi:

- a) caricamento delle immagini in Photoscan Pro
- b) controllo delle immagini caricate ed eliminazione di quelle non necessarie
- c) allineamento foto
- d) costruzione dense cloud point
- e) costruzione della mesh (modello 3D poligonale)
- f) generazione della texture
- g) costruzione del modello a tiled
- h) costruzione del DTM
- i) generazione dell'ortofoto
- j) esportazione dei risultati

Di seguito per ogni fase verranno riportati gli elementi significativi specifici del caso di studio.

a) caricamento delle immagini in Photoscan Pro e controllo

Escludendo dal dataset le foto che mostrano a varia altitudine il punto di partenza della missione, acquisite nei primi secondi ed alla fine della missione, tutte le altre foto possono essere caricate, successivamente potranno essere controllate per escluderne talune dal processamento. Sono state caricate 81 immagini in formato “jpg” che mostrano l’area di indagine.

b) controllo delle immagini caricate ed eliminazione di quelle non necessarie

Talune foto che possono apparire sfocate o caratterizzate da un certo rumore sono escluse dall’elaborazione in questa fase; solitamente tali inconvenienti sono più frequenti nell’acquisizione in assenza di gimbal e con velocità maggiori. Nel caso in esame la scelta di velocità di avanzamento significativamente bassa e l’utilizzo del gimball Zenmuse H3-2D ha consentito di acquisire immagini senza le suddette problematiche. Tutte le foto sono state incluse nel gruppo di elaborazione denominato nel software “Chunks”.

c) allineamento foto

Individuate le immagini da allineare, può essere avviata la fase di allineamento nella quale il software individua i descrittori delle immagini acquisite, effettua il matching delle immagini e successivamente individua il punto di presa del fotogramma. Il software consente la scelta di vari livelli di accuratezza nella stima della posizione della camera, aumentando l'accuratezza migliora la precisione della ricostruzione e chiaramente aumentano i tempi di elaborazione. Scegliendo un livello basso, è possibile avere una stima sommaria della ricostruzione utile a valutare preliminarmente se la stima dei punti di presa è coerente con la missione e se ci sono alcune foto che non sono state allineate.

E' consigliabile effettuare un allineamento veloce in quanto aiuta l'operatore nell'inserimento e nel posizionamento dei GCP in corrispondenza dei marker. L'operatore dovrà per ogni GCP specificare la posizione in due fotogrammi, dopodiché il software che ha già effettuato il matching dell'intero dataset, propone automaticamente la posizione del GCP in tutti i restanti fotogrammi che lo riprendono. Dopodiché sarà comunque cura dell'operatore verificare la posizione e magari migliorarne l'accuratezza; anche da ciò dipende la precisione del modello che si andrà a ricostruire.

Nel caso in oggetto sono stati inseriti 8 punti GCP in corrispondenza dei marker precedentemente rilevati con GPS, avendo cura di inserire il valore altimetrico LiDAR in sostituzione alla quota ellissoidica del GPS. Ultimato l'inserimento dei marker è stato effettuato un allineamento impostando l'accuratezza massima; in questo modo si ottiene la migliore stima del punto di presa della camera.

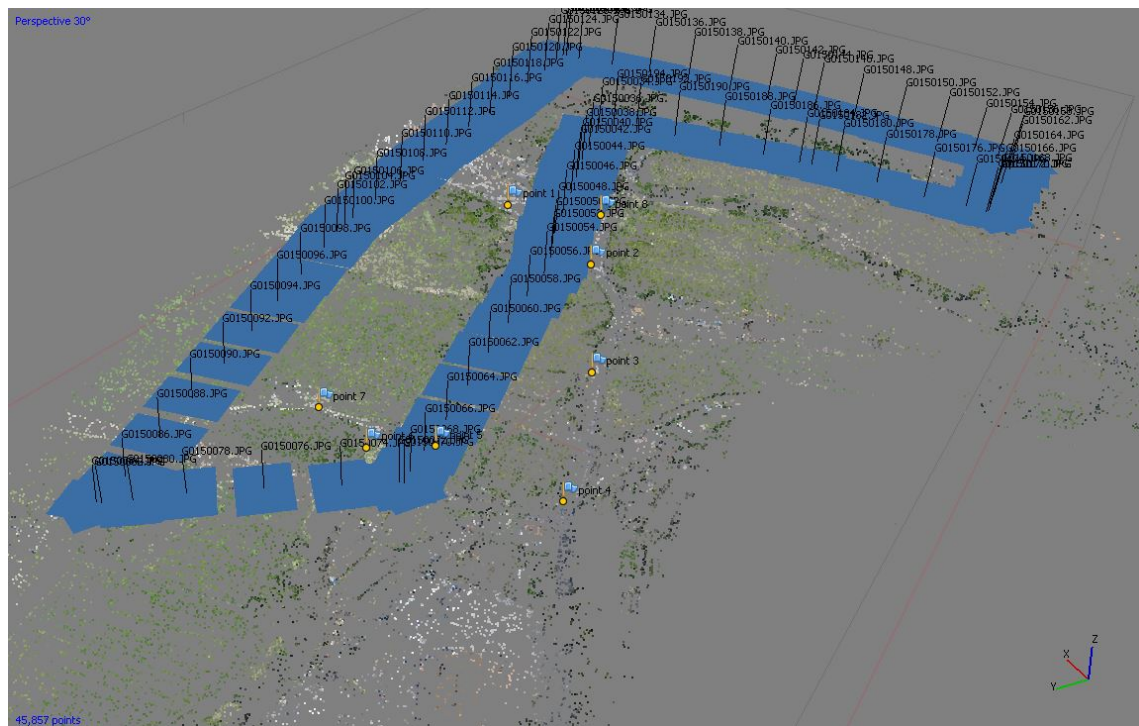


Figura 2.13 al termine dell'allineamento si ottiene la sparse cloude, tutti i fotogrammi sono orientati e posizionati nella scena

Ultimata la fase di allineamento il software ci restituisce i dati della presa, in pratica le coordinate X,Y e Z del centro del fotogramma, oltre alla nuvola di punti detta “sparse”. In pratica è la nuvola di punti generata dalle coppie di punti che collegano le immagini e sulle quali è stato effettuato l'allineamento. Tale nuvola di punti generata conta circa 50 mila punti di collegamento.

In questa fase è già possibile consultare la tabella riepilogativa degli scarti dei singoli GCP espressi in metri rispetto agli assi X, Y e Z ed in pixel.

d) costruzione dense cloud point

La fase successiva prevede la costruzione della nuvola di punti densa; tuttavia è bene effettuare preliminarmente una verifica dei punti di controllo determinati nella fase precedente. In pratica si effettua una scrematura dei punti della “sparse cloud”; dove ne vengono eliminati alcuni utilizzando uno dei diversi filtri che il software propone: Reprojection error, Reconstruction uncertainty, Image count, Projection Accuracy. Solitamente non vengono eliminati più del 10 % del campione di punti; un risultato significativamente diverso indica un cattivo allineamento delle immagini oppure una qualità scadente di quest'ultime.

Dopo aver impostato una soglia di Reprojection error adeguata all'errore generato, circa 1, sono stati eliminati tutti i punti con errore maggiore.

Sulla scorta dei punti di collegamento il software calcola i valori di profondità delle immagini e restituisce un'unica nuvola densa di punti. Photoscan realizza una nuvola di punti estremamente densa paragonabile a quella che può essere generata nel rilievo LiDAR. Tutti i punti possono essere classificati ed editati in Photoscan oppure possono essere esportati per altre lavorazioni in software specifici, ad esempio di classificazione.

Photoscan consente la scelta di diversi parametri funzionali alla ricostruzione della nuvola densa. Il primo "quality", rappresenta la qualità della ricostruzione intesa come grado di accuratezza e dettaglio della geometria; a livelli elevati di qualità corrispondono point cloud con un numero maggiore di punti che definisce maggiormente in dettaglio gli oggetti ripresi.

Possono essere scelti 4 livelli di qualità, partendo dal grado "Ultra high", dove viene determinata la posizione di ogni singolo pixel, per ogni grado inferiore di accuratezza l'immagine viene ridimensionata ad un quarto (2 volte per lato).



Figura 2.14 illustrazioni della dense cloud, visibile la ricostruzione della porzione urbanizzata



Figura 2.15 ulteriore illustrazione della dense cloude, visibile la ricostruzione della vegetazione ripariale

Nella fase di ricostruzione della dense cloude possono generarsi alcuni punti errati a causa di immagini mosse ad esempio, questo può provocare la creazione di punti non coerenti con il modello. Per ridurre tale problematica Photoscan utilizza diversi algoritmi di filtraggio che vengono utilizzati in funzione dell'elemento che si intende ricostruire. Ad esempio se la scena riprende oggetti caratterizzati dalla presenza di piccoli dettagli distinti che devono essere ricostruiti, è consigliabile impostare la modalità di filtro denominato “mild”, i valori potenzialmente anomali non vengono interpretati come punti di incertezza. Questa modalità può essere utile per l'elaborazione di immagini aeree nei casi in cui contiene una texture poco variegata, come ad esempio le coperture di edifici.

Nel caso in cui l'oggetto da ricostruire non contiene significativi piccoli dettagli, può essere indicato l'utilizzo di un filtro detto “agressive” che risolve la maggior parte dei valori ritenuti anomali. Questo filtro è quello maggiormente utilizzato per il processamento di immagini aeree, salvo i casi di cui sopra.

Nelle situazioni intermedie può essere ragionevole utilizzare il filtro “moderate” che media l'approccio delle due tipologie precedenti, oppure il filtro può essere del tutto disabilitato, seppur il risultato sia una nuvola caratterizzata da molto rumore.

Nel caso di studio si è scelto il filtro aggressivo come generalmente si adotta per le immagini aeree; il risultato dell'elaborazione ha portato alla creazione di una densa nube composta da oltre 18 milioni di punti.

e) Classificazione della nuvola di punti densa

La nuvola di punti generata contiene l'informazione topografica dell'oggetto che rappresenta; tuttavia per le finalità di generazione del DTM è necessario classificare i punti in base a ciò che rappresentano, ad esempio il terreno, i manufatti, la vegetazione etc...

PhotoScan permette la classificazione automatica della nuvola di punti, oltre a disporre di un tool di selezione e classificazione manuale. La classificazione automatica viene utilizzata per distinguere i punti di terra dal resto; mentre manualmente si possono effettuare ulteriori classificazioni.

Come meglio si vedrà nelle fasi successive, la classificazione è importante al fine di estrarre dall'elaborazione un DTM che per definizione rappresenta il modello del terreno, contrariamente a quanto sinora ricavato che rappresenta un DSM, comprensivo di tutto ciò che si sviluppa anche sopra il terreno.

La procedura automatica di classificazione si compone di due fasi. Nella prima fase la nube densa è divisa in celle di una certa dimensione. In ogni cella viene rilevato il punto più basso, la triangolazione di questi punti dà la prima approssimazione del modello del terreno, i punti rilevati vengono inclusi nella categoria "Ground".

Nella seconda fase vengono aggiunti alla classificazione precedente altri punti che soddisfano le seguenti condizioni:

- il punto si trova entro una certa distanza dal modello del terreno;
- l'angolo tra il modello del terreno e la linea che collega un nuovo punto con un punto classificato come "Ground" è inferiore ad un certo valore.

La verifica della seconda condizione viene ripetuta per tutti i punti da controllare nella nuvola densa.

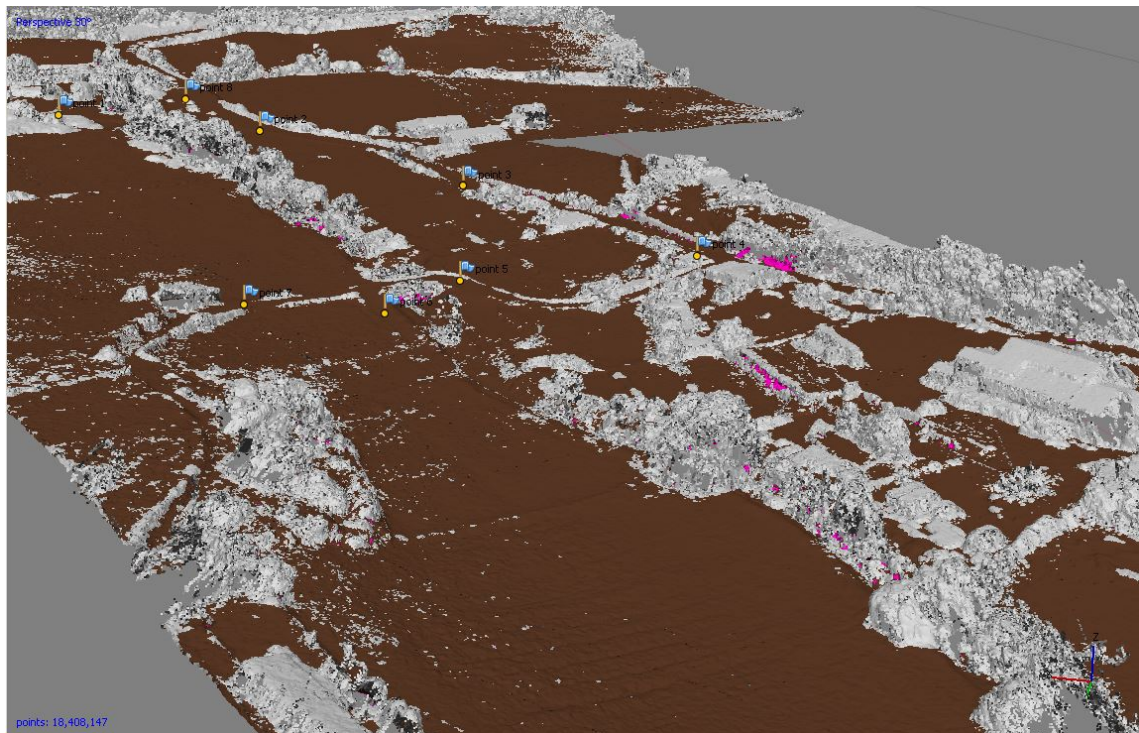


Figura 2.16 risultato della classificazione automatica della dense cloude

In ragione di quanto sopra, la classificazione viene resa indicando i valori dei tre parametri di seguito specificati.

- L'angolo massimo, determina una delle condizioni di inclusione nella classe "Ground"; l'angolo deve essere scelto in funzione della pendenza massima che ragionevolmente possiamo avere nel modello.
- La massima distanza, anch'essa determina una delle condizioni di inclusione nella classe "Ground"; questo parametro determina l'assunto della massima variazione altimetrica alla volta.
- Dimensione della cella, determina la dimensione della cella con cui viene suddivisa la nuvola densa di punti nella fase preparatoria. La dimensione della cella dovrebbe essere almeno grande quanto la massima aerea individuabile nel modello in cui non è presente alcun punto a terra.

L'applicazione al caso di studio ha indicato come angolo massimo il valore di 15°, la dimensione della cella pari a 50 metri e la massima distanza pari a 12 cm.

La classificazione ha consentito di evidenziare le parti della nuvola densa che rappresentano il terreno.

f) costruzione della mesh (modello 3D poligonale)

Una volta ottenuta la nuvola di punti (dense cloude) può essere generata la mesh vettoriale. Anche in questo caso il software propone diversi parametri a scelta, al fine di migliorare i risultati della ricostruzione in funzione dell'oggetto rilevato o della superficie di quest'ultimo. In particolare la scelta può riguardare la modalità "arbitrary" utilizzabile per qualsiasi oggetto, in special modo per oggetti chiusi; diversamente per immagini aeree può essere utilizzata la modalità "Height field", propriamente ottimizzata per la ricostruzione da immagini aeree e grazie a ciò consente di trattare dataset più grandi.

Stabilita la modalità di generazione della mesh, viene indicata la fonte dei dati a scelta tra la dense cloude o sparse cloude per una generazione veloce e sommaria.

Altro parametro personalizzabile è il numero di poligoni generati; i valori predefiniti sono high, medium, low; con valori di poligoni in base al numero di punti della dense cloude e rispettivamente di 1/5, 1/15, e 1/45. E' inoltre possibile specificare un valore personalizzato; chiaramente a valori troppo bassi corrisponde una geometria poco fedele mentre valori eccessivamente elevati possono creare problemi di visualizzazione ed editing in software esterni.

Il pannello di creazione della mesh mette a disposizione anche uno strumento relativo all'interpolazione della geometria; se la modalità è disattivata viene generata una mesh molto precisa corrispondente ai punti della nuvola, viceversa la modalità interpolazione attivata genera una mesh in cui eventuali aree prive di punti vengono chiuse interpolando i punti limitrofi. La funzione può comunque lasciare aree vuote che data la loro ampiezza non possono essere risolte automaticamente ma impongono l'intervento dell'operatore in post elaborazione.

Esiste anche la modalità Extrapolated che genera un modello completamente privo di buchi, tuttavia è possibile che possano essere generate, per interpolazione, ampie aree che devono eventualmente essere eliminate in post elaborazione.

L'ultimo strumento che mette a disposizione Photoscan consente il filtraggio delle categorie di punti che vogliamo utilizzare per la creazione della mesh. Ciò vale soltanto dopo aver effettuato la procedura di classificazione della nuvola di punti; nel nostro caso ad esempio, per la generazione di un DTM, la mesh dovrà riguardare esclusivamente i punti classificati come "Ground", diversamente per la creazione di un

DSM dovrà essere utilizzata l'intero set di punti che comprenderà chiaramente manufatti, vegetazione etc ...

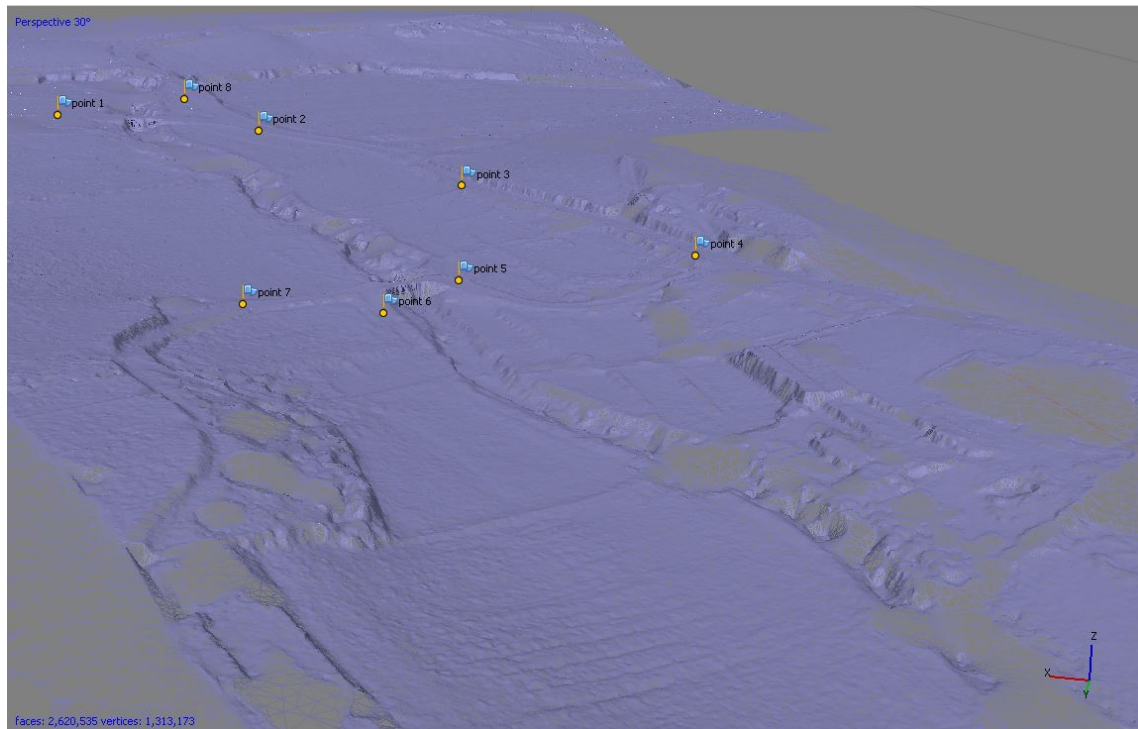


Figura 2.17 illustrazione della mesh utilizzata per generare il DTM

Nell'elaborazione del caso di studio è stata impostata la funzionalità di interpolazione attiva, ed è stato utilizzata la sola componente classificata come "Ground" della nuvola di punti. Il numero di poligoni generati con la modalità high è stato di oltre 2,5 milioni.

g) generazione della texture

La fase di generazione della texture conclude essenzialmente la fase di ricostruzione tridimensionale dell'oggetto rilevato. Sono disponibili diverse modalità di elaborazione della texture a seconda delle tipologie di oggetto.

Nel caso in esame, viste le finalità di estrazione del DTM, non è stato necessario elaborare una texture per il modello.

h) costruzione del modello a tiled

Il modello a tiled è usato generalmente per migliorare la visibilità di modelli di grandi dimensioni visibili in alta definizione. Anche in questo caso per le finalità dello studio non è stato necessario effettuare alcuna elaborazione in proposito.

i) costruzione del DTM

PhotoScan permette di generare e visualizzare un modello digitale di elevazione (DEM), che può essere un DSM (Digital Surface Model) se riporta la quota tutti gli oggetti ripresi nella scena, oppure un DTM (Digital Terrain Model) se riporta la quota del solo terreno.

In Photoscan il DEM può essere rasterizzato a partire dalla nuvola di punti densa, dalla nuvola di punti sparsa o dalla mesh vettoriale creata nel punto **e)** precedente.

Tenuto conto della applicazioni possibili è consigliabile utilizzare come base per la rasterizzazione i dati della nuvola di punti densa, diversamente la nuvola sparsa può essere utilizzata per elaborazioni preliminari.

Allo stesso modo della creazione della mesh, con cui condivide molti aspetti funzionali, anche in questo caso è possibile utilizzare la funzionalità della classificazione dei punti, pertanto sarà possibile ricavare il DTM utilizzando i soli punti classificati come “Ground”, oppure utilizzare l’intera dense cloude per generare un DSM.

Coerentemente con quanto riportato a riguardo della creazione della mesh, anche in questo caso lo strumento di generazione del DEM consente la scelta delle funzionalità di interpolazione attivata o meno.

Infine lo strumento di generazione del DEM consente l’impostazione della dimensione del pixel, suggerendo di default la risoluzione al suolo stimata tenendo conto dei dati di origine.

La generazione del DTM da utilizzare per le simulazione idrauliche ha previsto l’utilizzo della sola nuvola di punti densa classificata come “Ground” e la modalità interpolazione attiva. La dimensione del pixel proposta dal software era di 12 cm ed è stata mantenuta.

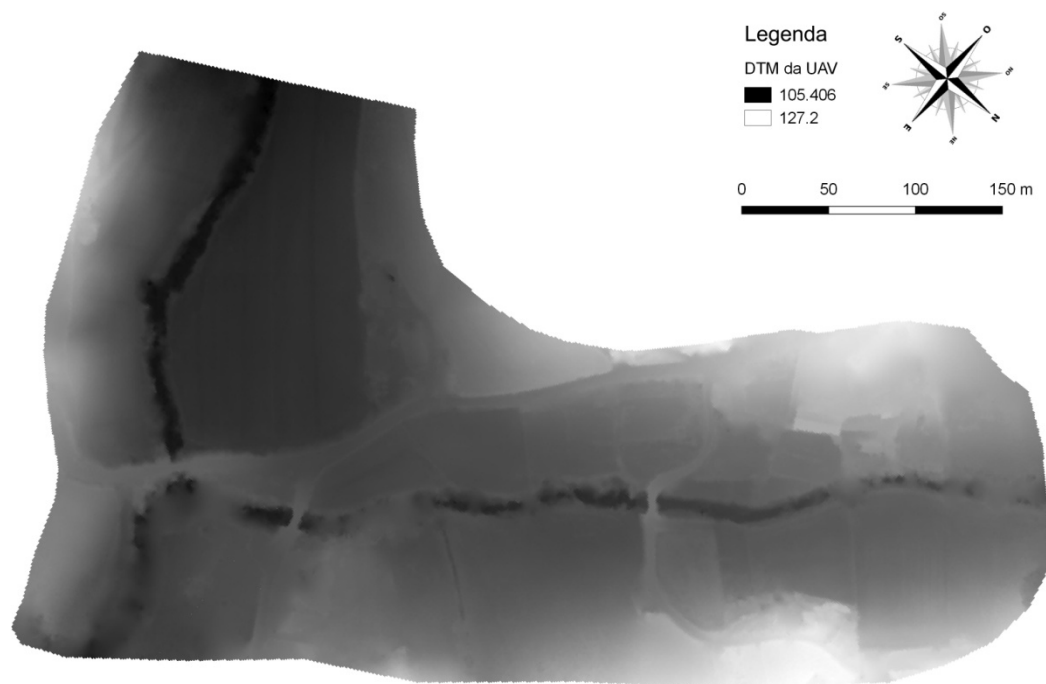


Figura 2.18 illustrazione della DTM ottenuto

j) generazione dell'ortofoto

La generazione dell'ortomosaico viene effettuata per la realizzazione di foto aeree ad alta risoluzione. La consultazione del DTM congiuntamente con la foto aerea, può rivelarsi utile per fornire un'interpretazione maggiormente completa dell'area indagata; ad esempio può rivelarsi particolarmente utile nel riconoscimento e censimento di tutti quegli elementi che data la loro dimensione o caratteristica geometrica possono sfuggire alla ricostruzione topografica, ma possono avere rilevanza ai fini della simulazione idraulica.

Il processamento dell'ortomosaico prevede l'impostazione di alcuni parametri di configurazione come il metodo di fusione delle immagini e la dimensione del pixel.

In generale per dataset relativi ad immagini aeree viene utilizzata il metodo "Mosaic" che implementa un approccio basato sulla divisione dei dati in diversi domini di frequenza che si fondono in modo indipendente. Il software propone anche un'altro metodo denominato "average" che utilizza il valore medio ponderato di tutti i pixel delle singole foto; in alternativa la fusione può essere disabilitata. Nel caso di variazioni della luminosità può essere attivato il comando di correzione del colore; infine viene

indicata la dimensione del pixel dell'immagine di output che può eventualmente essere modificato.

La generazione dell'ortomosaico ha utilizzato il metodo "Mosaic" ed è stata attivata la correzione del colore; la dimensione del pixel proposta è stata di 6 cm e non è stata variata; ciò ha consentito l'esportazione di un'immagine ad alta risoluzione.

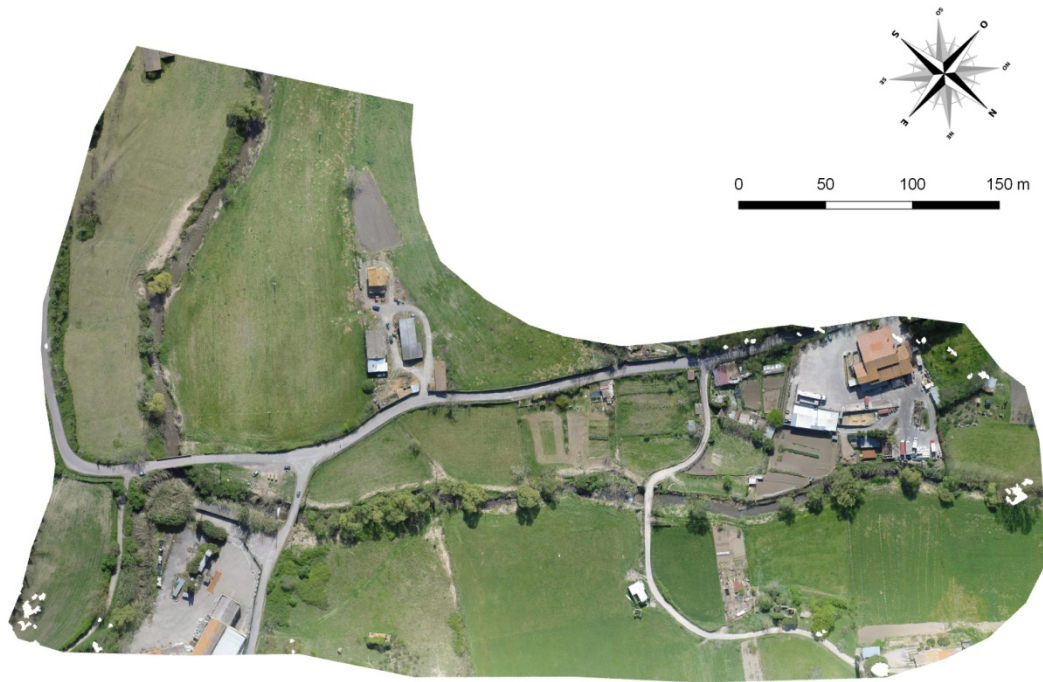


Figura 2.19 illustrazione dell'ortofoto

k) esportazione dei risultati

La generazione del DTM e dell'ortomosaico rappresentano i risultati esportati nelle relative fasi di generazione; non sono stati utilizzati ulteriori dati derivanti dalle elaborazioni del software Photoscan.

2.4) MODELLISTICA IDROLOGICA

Al pari del DTM, anche per la modellistica idrologica possono essere proposti ed adottati sia modelli che ricalcano la metodologia standard, sia modelli avanzati.

Nell'ambito del presente studio, oltre alla valutazione degli effetti indotti nella simulazione idraulica dal differente DTM, potranno essere valutati anche gli effetti causati dall'adozione di due modelli idrologici diversi che produrranno due idrogrammi di progetto diversi.

Quest'ultimi verranno applicati successivamente al modello di propagazione bidimensionale finalizzato alla determinazione delle mappe di allagabilità.

I modelli idrologici che si intende adottare sono il metodo concettuale della Formula Razionale dell'Autorità di Bacino del Tevere ed il modello EBA4SUB (Event Based Approach for Small and Ungauged Basins).

Al termine della descrizione del metodo utilizzato si riportano in linea generale gli elementi essenziali mediante i quali si è pervenuti alla determinazione dell'idrogramma di progetto dell'onda di piena.

2.4.1) Metodo concettuale della Formula Razionale dell'Autorità di Bacino del Tevere

Il metodo concettuale della Formula Razionale tiene in considerazione i fenomeni che agiscono sul bacino e creano la portata massima; la massima portata di piena viene stimata utilizzando la formula razionale:

$$Q_{\max} Tr = \frac{h_{d,TR} \cdot k_r \cdot k_d \cdot A}{3,6 \cdot t_c}$$

dove:

$Q_{\max}$, TR rappresenta la portata di picco misurata in m³/s;

$h_{d,TR}$ rappresenta lo spessore di pioggia di durata del tempo di ritorno TR in mm,

k_r indica il fattore di ragguaglio all'area;

k_d indica il coefficiente di deflusso di piena;

t_c rappresenta il tempo di corrivazione del bacino, misurato in h

A indica la superficie del bacino idrografico espresso in Km².

Ciascun termine viene stimato seguendo le procedure descritte nell'ambito del Piano Direttore di Bacino del Fiume Tevere come riportato di seguito.

a) $h_{d,T}$ – spessore di pioggia di durata del tempo di ritorno Tr in mm

L'altezza della pioggia indicata come $h_{d,t}$, viene calcolata attraverso l'utilizzo delle Linee Segnatrici di Possibilità Pluviometrica della Regione (LSPP). Tale indice può essere individuato pur non essendo a conoscenza dei dati storici pluviometrici del sito oggetto di studio attraverso la procedura di regionalizzazione, ottenendo dunque una curva di probabilità pluviometrica in qualsiasi luogo purché si trovi all'interno del bacino del Fiume Tevere:

$$h_{d,t} = K_T E[H_1] d^{0.29}$$

dove:

d indica la durata della pioggia critica espressa in ore,

K_T è un valore tabellare nel quale per ogni periodo di ritorno principale T (da 5 a 1000 anni) corrisponde un quantile adimensionale.

$E[H_1]$ indica il valore della pioggia indice di durata un'ora, il quale si ottiene applicando la formula che segue:

$$E[H_1] = (s_1 + 1) \left(\overline{h_{1,reg}} \right)$$

dove:

$h_{1,reg}$ è la media regionale delle altezze massime di precipitazione di durata un'ora. Tale parametro, secondo quanto affermato dal PAI, risulta essere 29 mm.

s_1 indica il fattore di trasferimento della media dei massimi annuali di durata un'ora e per ottenerlo si fa riferimento alla funzione della latitudine del centroide del bacino:

$$S_1 = 90.7 \frac{Z}{L} - 11.4 \frac{Z}{Y}$$

dove Z/L e Z/Y vengono calcolati sulla base delle tabelle contenute nel PAI nelle quali il sistema di coordinate utilizzato è quello UTM.

b) kr – fattore di ragguaglio dell'area

Il coefficiente di riduzione, anche detto di ragguaglio, esprime il rapporto tra la pioggia media sul bacino e quella misurata presso il centro di scroscio, punto di massima intensità dell'area. Il fattore di ragguaglio è stimato secondo la seguente formula:

$$kr = 1 - \exp(-0.033 \cdot E[h_1] \cdot 1.1 \cdot t_c^{0.25}) + \exp(-0.033 \cdot E[h_1] \cdot 1.1 \cdot t_c^{0.25} - 0.01A)$$

c) kd – coefficiente di deflusso di piena

Il coefficiente di deflusso della piena distingue le due componenti di pioggia lorda e pioggia netta. Il valore può essere stimato in funzione della permeabilità del suolo e del tempo di ritorno come ad esempio succede nel PAI dell'Autorità di Bacino del Tevere. Nel caso in cui oggetto di studio sia un piccolo bacino idrografico è possibile utilizzare la procedura per la piena di riferimento riportata nel Quaderno

idrologico del bacino del fiume Tevere “Regionalizzazione delle piogge con durata da 1 a 5 giorni e da 1 a 24 ore”.

a) t_c – tempo di corrivazione del bacino misurato in h

il tempo di corrivazione ($t_{c(h)}$), rappresenta il tempo che occorre alla generica goccia di pioggia caduta nel punto idraulicamente più lontano a raggiungere la sezione di chiusura. La durata della pioggia critica è stata comparata al tempo di corrivazione del bacino, calcolato mediante la relazione di Giandotti (1984):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m}}$$

Ovviamente, il tempo di corrivazione è una caratteristica morfologica del bacino in questione e dipende dalla A ossia la superficie di quest’ultimo espresso in Km^2 , dalla lunghezza dell’asta principale L in Km e infine dall’altitudine media del bacino rispetto alla sezione di chiusura H_m in metri.

Una volta determinata la portata di piena, ai fini della simulazione idraulica occorre determinare l’idrogramma di progetto della piena.

Quest’ultimo assume un ruolo rilevante nella metodologia convenzionale in quanto rappresenta lo strumento di base per la valutazione del volume della piena in una particolare sezione.

Gli idrogrammi di piena nei tratti dei corsi di acqua appartenenti al reticolo secondario, minore e marginale (non compresi nel reticolo principale), in assoluta mancanza di osservazioni dirette, sono determinati secondo quanto suggerito dal **PAI**. La mancanza di osservazioni dirette, sia nel tratto di corso d’acqua in esame che in altri ritenuti idrologicamente e idraulicamente simili, giustifica il ricorso alla procedura che segue.

L’intenzione è di avere un modello unico fondato su un semplice modello afflussi-deflussi che prenda in considerazione gli aspetti probabilistici che possono essere applicati dove non si evidenziano dati diretti delle portate durante i fenomeni di piena. Nei bacini minori del Tevere vi è una simultaneità tra piene fluviali ed eventi pluviometrici di breve durata e forte intensità.

L’aumento progressivo delle portate dà luogo ad un innalzamento dei tiranti idrici, spesso accompagnato da pericolosi fenomeni di rigurgito determinati dagli ostacoli presenti nell’alveo. Nel caso in cui non si abbiano misure idrometriche è

possibile impiegare formule e schematizzazioni di facile applicazione al fine di poter definire in maniera chiara il fenomeno di moto vario, come suggerito dal **PAI**.

Le caratteristiche geomorfologiche del bacino sono gli elementi che definiscono la forma dell'idrogramma; infatti se queste conoscenze avessero un accettabile livello di dettaglio la definizione dell'idrogramma di piena seguirebbe procedure più avanzate, supportate dalla conoscenza diretta dei fenomeni storici osservati e misurati.

In caso contrario la costruzione dell'idrogramma deve necessariamente ricondursi a un metodo assolutamente empirico, così come peraltro quello della formula razionale per la stima della portata di colmo. Il **PAI** assume che un idrogramma di piena conseguente a una pioggia isolata si possa suddividere in tre parti:

- il ramo ascendente o di concentrazione è quello che precede l'inizio del fenomeno piovoso e caratterizza la fase di esaurimento del fiume. Le portate che vengono rappresentate derivano solo da deflussi sotterranei generati da precipitazioni verificatesi precedentemente;
- il segmento di colmo: col sopraggiungere in alveo dei deflussi superficiali conseguenti alla pioggia, le portate crescono rapidamente e l'idrogramma si impenna fino a raggiungere il colmo;
- il ramo discendente o di esaurimento: le portate superficiali cominciano quindi a diminuire fino a cessare del tutto in corrispondenza di un certo istante a partire dal quale inizia il ramo di esaurimento formato da soli deflussi sotterranei.

L'idrogramma fornisce indicazioni su come variano le portate nel tempo durante gli eventi di piena:

- per $t < t_c$, (prima fase del diagramma). L'equazione che rappresenta il ramo ascendente della curva è :

$$Q_{(t)} = Q_o + (Q_{max} - Q_o) \cdot \sin^4(\pi/2 \cdot t/t_c)$$

Con la Q_{max} si indica la portata di colmo e con la Q_o la portata di base all'inizio dell'evento di piena;

- per $t_c \leq t \leq t_c + k$, (seconda fase) il segmento di colmo è rappresentato dalla retta di equazione:

$$Q_{(t)} = Q_{max}$$

- per $t > t_c + k$ (ramo di esaurimento rappresentato dalla terza fase del diagramma) e fino al ristabilirsi della portata $Q = Q_o$ l'equazione della curva è:

$$Q = Q_{max} \cdot e^{-1.387 \left(\frac{t}{t_c + k} - 1 \right)}$$

Nel caso in cui non siano noti i dati sperimentali, verrà utilizzato il seguente metodo:

- per i *piccoli bacini* ($s \leq 100 \text{ Km}^2$) si possono assumere $k=0$ e $Q_o=0$ ottenendo un diagramma $Q(t)$ che passa per l'origine degli assi, raggiunge il valore massimo in un solo istante e quindi decresce;
- per i *grandi bacini* ($500 \text{ Km}^2 \leq s \leq 1000 \text{ Km}^2$) si possono assumere: $k=(1/4-1/3) t_c$ e $Q = 5-10 \text{ Km}^2$;
- per i bacini di superficie compresa tra le prime due classi si possono assumere i valori intermedi.

Dopo aver impostato i valori dei vari termini della formula ed assunto alcuni valori ed ipotesi di progetto, è stato possibile determinare gli idrogrammi con tempo di ritorno pari a 10, 50, 100, 200 e 500, riportati nel grafico di seguito.

2.4.2) Modello idrologico avanzato EBA4SUB

In alternativa al metodo concettuale basato sulla Formula Razionale, è stata sviluppata una procedura di tipo event-based per stimare l'onda di piena di progetto utilizzabile anch'essa nelle condizioni di minima disponibilità di dati (Grimaldi S., Petroselli A. Nardi F., 2012; Grimaldi S., Petroselli A., 2014; Grimaldi S., Petroselli A. Arcangeletti E., Nardi F., 2013).

L'approccio event-based si basa sull'utilizzo degli idrogrammi di progetto, attraverso i quali viene fornito l'andamento dell'intensità di precipitazione nel corso della durata dell'evento simulato. Esso si fonda in particolare sull'individuazione di un evento critico di precipitazione, caratterizzato da un certo tempo di ritorno, che viene convertito nel corrispondente evento critico di piena che verrà in seguito utilizzato per determinare la mappa di esondazione relativa.

Si cerca dunque, mediante tale metodologia di ridurre, per quanto possibile, il grado di empirismo che caratterizza la procedura tradizionale PAI e in particolare si cerca di risolvere le problematiche insite nella formula razionale per la definizione della

portata al colmo e nella definizione della forma dell'idrogramma, secondo quanto evidenziato da recenti studi di letteratura (Grimaldi S., Petroselli A., 2015; Grimaldi S., Petroselli A., Serinaldi F. 2012)

La procedura prevede l'utilizzo del modello EBA4SUB (Event Based Approach for Small and Ungauged Basins) approccio a scala di evento per piccoli bacini non strumentati, il quale prevede diverse fasi successive e precisamente:

- stima la precipitazione lorda di progetto,
- individuazione dello ietogramma di progetto,
- stima della precipitazione netta,
- applicazione del modello di trasformazione afflussi-deflussi.

Tale procedura è strutturata in modo da rappresentare un approccio ottimale per bacini di limitate dimensioni (assumendo come massimo valore quello per cui l'ipotesi di precipitazione spazialmente uniforme sia ancora ammissibile) e privi di misurazioni di portata.

Il modello EBA4SUB ha la particolarità di modificare, ottimizzare ed adattare le classiche procedure event-based ai casi in cui le informazioni di portata sono assenti. Sostanzialmente tale modello rappresenta un'empirica procedura event-based, che può essere applicata con le medesime informazioni necessarie all'utilizzo della formula razionale. Le informazioni di base sono le curve di possibilità pluviometrica (IDF- Intensità, Durata, Frequenza- a 2 parametri) per il bacino considerato, il modello digitale del terreno (DEM) modello che peraltro oggi facilmente reperibile, gratuito disponibile in elevate risoluzioni e il tipo del suolo ed eventuali mappe.

Gli elementi innovativi caratterizzanti EBA4SUB, grazie ai quali differisce dalle versioni tradizionali dei modelli event-based, riguardano il modulo della stima delle precipitazioni nette e quello di afflussi-deflussi.

Il modulo della stima delle precipitazioni nette fa riferimento ad un modello misto di Curve Number for Green Ampt (CN4GA), mentre il secondo fa riferimento ad una versione mono-parametrica dell'idrogramma unitario istantaneo di tipo geomorfologico basato sulla funzione di ampiezza (Grimaldi S., Petroselli A. Romani N., 2013).

L'adozione di uno ietogramma di progetto permette di migliorare l'ipotesi di intensità media di precipitazione costante caratteristica della formula razionale; la pioggia netta è stimata applicando una procedura mista che accoppia un'equazione di infiltrazione al metodo SCS-CN (Soil Conservation Service, ora NRCS, Natural Resources Conservation Service) CN (Curve Number), attraverso il quale viene migliorata l'incertezza della stima del coefficiente di deflusso; infine l'applicazione di un modello afflussi-deflussi di tipo geomorfologico sfrutta la disponibilità dei modelli digitali del terreno per fornire un idrogramma la cui forma non è solo concettualmente assunta ma è anche fisicamente basata.

La determinazione dell'idrogramma di progetto si è basata sull'utilizzo delle curve di possibilità pluviometrica del bacino oggetto di studio, note come IDF (Intensità, Durata e Frequenza), il modello digitale del terreno e le mappe di uso del suolo come riportate nel capitolo successivo.

2.5) APPLICAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE E DETERMINAZIONE DELLE MAPPE DI ALLAGABILITA'

I DTM ottenuti dall'elaborazione delle immagini acquisite con UAV ed il corrispettivo LiDAR saranno utilizzati come input per la simulazione idraulica, in particolare il DTM costituirà il dominio di calcolo del modello.

Attualmente la determinazione delle aree di rischio per esondazione può essere eseguita attraverso l'utilizzo di software per modelli idrologici ed idraulici bidimensionali (2D); in contrapposizione a modelli monodimensionali tipo HEC-RAS.

I modelli 2D, disponibili oggi anche con interfaccia grafica, sono in grado di simulare l'inondabilità di canali e conoidi, la dinamica afflussi-deflussi, le colate detritiche e l'allagamento di aree costiere per effetto di mareggiate e tsunami.

2.5.1) Caratteristiche del modello di propagazione

La simulazione della propagazione idraulica è stata realizzata mediante il software FLO-2D, attraverso la suddetta simulazione è possibile determinare le aree di rischio per determinati tempi di ritorno in funzione di un idrogramma di piena determinato a valle della modellistica idrologica afflussi-deflussi.

Il pacchetto FLO-2D è basato proprio su un modello bidimensionale e presenta le seguenti principali caratteristiche:

- Modello fisicamente basato;
- Conserva i volumi e ne fornisce un report;
- Modello idrologico ed idraulico;
- Simulazione della propagazione dell'onda di piena anche senza specificare condizioni al contorno o iniziali predefinite (hot starts);
- Propaga l'intero idrogramma.

2.5.2) Applicazione di FLO-2D al caso di studio del Fosso del Maschiolo

Il software è composto da vari moduli che si integrano tra loro; la definizione delle condizioni di input e di tutte le impostazioni necessarie è effettuata attraverso il modulo Grid Developer System (GDS), mentre le variabili relative alla caratterizzazione del torrente, inteso come pendenza del letto, sono impostate attraverso il modulo PROFILES. Entrambi i suddetti moduli costituiscono, congiuntamente al modulo FLOENVIR, la suite di elaborazione PRE-PROCESSOR.

I risultati della simulazione possono essere visualizzati con i moduli facenti parte della suite POST-PROCESSOR costituita da MAPPER, HYDROG, MAXPLOT e PROFILES.

Il workflow del software relativamente all'inserimento delle condizioni di input prevede diverse fasi:

- a) Importazione del DTM da utilizzare per la simulazione
- b) Creazione della griglia di calcolo
- c) Importazione di un'immagine aerea (eventuale)
- d) Definizione del dominio di calcolo
- e) Assegnazione della quota alle celle del dominio di calcolo
- f) Creazione del canale e definizione della geometria dello stesso
- g) Assegnazione dell'idrogramma di ingresso
- h) Selezione delle celle di uscita dal dominio di calcolo
- i) Attribuzione dei coefficienti di scabrezza

- j) Modifica grafica dei parametri di ARF (Area Reduction Factor) e WRF (Width Reduction Factor).
- k) Identificazione di altri attributi della floodplain (strade, argini ed infiltrazione)
- l) Esportazione dei risultati

Di seguito per ogni fase verranno riportati gli elementi significativi specifici del caso di studio.

a) Importazione del DTM da utilizzare per la simulazione

Il primo passo del procedimento è rappresentato dall'importazione del DTM sul quale verrà costruita successivamente la griglia di calcolo. E' possibile utilizzare diversi formati sia raster che file di testo contenenti almeno le coordinate dei punti e la rispettiva quota altimetrica.

Nel caso di studio, i DTM utilizzati erano entrambi in formato grid e sono stati importati all'interno della GDS (Grid Developer System) senza ulteriore elaborazione, esclusa l'esportazione in formato ASCII.

b) Creazione della griglia di calcolo

Il passo successivo prevede la creazione della griglia di calcolo; a tal fine è necessario specificare il passo della griglia, ossia la dimensione del lato della cella che rappresenta l'unità elementare del modello. Successivamente ad ogni cella viene attribuito almeno il valore altimetrico. Inoltre, come si vedrà meglio in seguito, possono essere impostate anche altre variabili che completano la simulazione.

Da quanto sopra è chiaro che la creazione della griglia rappresenta un elemento centrale della simulazione in quanto definisce la risoluzione con il quale il modello effettua la simulazione e ci restituisce l'eventuale allagamento. Maggiore è la risoluzione, maggiore è l'accuratezza con cui vengono definite le aree allagabili.

Per contro è evidente che a risoluzioni maggiori, (piccola dimensione della cella), corrispondano lunghi tempi di elaborazione. Pertanto è evidente che la scelta della griglia deve essere basata sul giusto compromesso tra una accurata rappresentazione della morfologia del terreno ed un numero massimo accettabile di celle. Indicativamente il valore massimo derivante dal rapporto tra il valore di picco della portata e l'area della cella non dovrebbe superare il valore di $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$; oltre

questo valore il calcolo potrebbe divenire instabile, seppur la simulazione può avere luogo. Le prove sono state impostate effettuando cinque simulazioni per i tempi di ritorno: 10, 50, 100 e 200 e 500 anni.

c) Importazione di un'immagine aerea (eventuale)

L'impostazione di alcuni attributi caratteristici della floodplain impone la conoscenza dei luoghi oltreché della morfologia del terreno intesa come valore altimetrico. Attraverso la foto-interpretazione dell'immagine aerea è possibile inserire elementi aggiuntivi alla simulazione utilizzando la definizione degli attributi come illustrati nel paragrafo di seguito. L'immagine è comunque estremamente utile anche per l'individuazione delle celle che costituiranno il canale.

Nel caso in esame è stata utilizzata l'immagine aerea ad alta definizione ricavata dal rilievo con UAV ed in aggiunta la Carta Tecnica Regionale a Scala 1: 5.000.

d) Definizione del dominio di calcolo

Una volta creata la griglia ed inserita l'immagine aerea è stato possibile individuare il dominio di calcolo. Il dominio di calcolo rappresenta l'effettiva area all'interno della quale il software effettua la simulazione, pertanto la sua individuazione dovrà necessariamente contenere tutte le aree che saranno potenzialmente allagabili, infatti il software considera tale delimitazione "invalidabile" per il tirante idrico.

e) Assegnazione della quota alle celle del dominio di calcolo

I punti quotati del DTM possono essere originariamente a passo regolare o distribuiti casualmente nel dominio. Pertanto ogni cella della griglia di calcolo può contenere uno o più punti quotati o non contenerne nessuno. Visto che per l'impostazione degli input di FLO-2D è necessario che ad ogni cella sia assegnata una quota altimetrica, il software è provvisto di un metodo di interpolazione del DTM per poter assegnare ad ogni cella la propria quota sulla base dei punti ricadenti nella cella stessa o dei punti più prossimi alla posizione.

Nelle prove è stato utilizzato un DTM con risoluzione maggiore della griglia, pertanto è inevitabile che ogni nodo o cella della griglia ricada in 2 o più punti quotati riconducibili al pixel del raster, conseguentemente il valore altimetrico della griglia deriverà dall'interpolazione dei valori del DTM utilizzato.

f) Creazione del canale e definizione della geometria dello stesso

La propagazione del flusso nel canale è una parte essenziale della simulazione con FLO-2D. La componente aggiuntiva del canale va sempre utilizzata quando la geometria del canale canalizza una parte non trascurabile del volume di piena. Il flusso nel canale viene simulato come monodimensionale (1-D) una volta predefinita la geometria tramite le sezioni trasversali. Viene simulato lo scambio interattivo tra canale e floodplain incluso il flusso di ritorno dei volumi esondati.

Nell'ambito del presente lavoro, è stato creato un canale con il modulo GDS assegnando i parametri necessari alla definizione del comportamento idraulico, quali la definizione geometrica delle sezioni e l'altezza degli argini.

In considerazione delle finalità del presente studio indirizzate al confronto delle aree allagabili nella floodplain, la sezione del canale è stata definita in maniera univoca per tutte le prove, ciò consente di escludere dai risultati la variabilità che proprio la definizione dell'alveo poteva comportare, in ragione della sua interattività con la floodplain.

Nella prova, l'alveo è stato definito con una sezione rettangolare di larghezza pari a 6 metri e profondità pari a 2,5 m per tutto il suo corso. Tale dimensionamento deriva dall'osservazione di diverse sezioni utili nei luoghi in esame.

g) Assegnazione dell'idrogramma di ingresso

Sulla scorta del tracciato dell'asta fluviale e del perimetro del dominio di calcolo, viene individuata la cella del grigliato a cui associare le condizioni di ingresso (INFLOW), attraverso l'utilizzo di un idrogramma di progetto che deriva dall'applicazione del modello afflussi-deflussi sul bacino dell'asta di riferimento.

Nel caso in oggetto è stata scelta una cella individuata nel tracciato dell'alveo del Fosso del Maschiolo prossima al perimetro del dominio di calcolo. Attraverso l'applicazione della modellistica idrologica già descritta nel paragrafo 2.4, sono stati determinati 5 idrogrammi di progetto corrispondenti a 5 tempi di ritorno, e precisamente Tr 10, Tr50, Tr 100, Tr 200 e Tr 500, per i due diversi modelli, Formula Razionale ed EBA4SUB.

h) Selezione delle celle di uscita dal dominio di calcolo

Il dominio di calcolo definito rappresenta uno spazio delimitato al di fuori del quale il flusso non può avvenire. In pratica, i confini costituiscono muri invalicabili indefinitamente alti. In tal modo il flusso che scorre verso i confini del dominio si accumulerebbe in corrispondenza delle celle perimetrali, a meno che non si definiscano le celle di uscita del flusso dal dominio (OUTFLOW). Le celle di uscita permettono la fuoriuscita del flusso dal dominio senza influenzare le condizioni idrauliche (tirante e velocità) del flusso stesso.

Nel caso in oggetto, le celle di uscita sono state individuate nella zona prossima alla confluenza con il fiume Marta e lungo l'argine destro dello stesso, ciò ha consentito di evitare interferenze della simulazione nelle aree di floodplain prossime all'asta di riferimento.

i) Attribuzione dei coefficienti di scabrezza

Un ulteriore parametro che influenza i risultati di una simulazione idraulica è dato dalla scabrezza delle superfici. Il modello idraulico bidimensionale FLO 2D tiene conto dei coefficienti di scabrezza e questi devono essere noti per ogni cella del dominio di calcolo. Per l'attribuzione dei valori di scabrezza (coefficiente di Manning) può essere utilizzata una zonizzazione di copertura del suolo nella quale ad ogni utilizzo è associato un valore del coefficiente secondo la tabella di seguito.

Copertura del suolo	Coefficiente di scabrezza di Manning (s/m^{1/3})
Agricolo	0,12
Forestale	0,6
Urbano	0,05
Canale	0,04

Tabella 2.2 Valori dei coefficienti di scabrezza adottati per l'applicazione del modello idraulico.

Il software effettua l'interpolazione tra lo shape che contiene i valori del coefficiente di Manning e la griglia del dominio di calcolo; in questo modo ad ogni cella viene attribuito il giusto valore per l'esecuzione della simulazione.

j) Modifica grafica dei parametri di ARF e WRF

Il modello idraulico mette a disposizione ulteriori strumenti per migliorare l'accuratezza della simulazione inserendo elementi dell'urbanizzazione che possono avere un'influenza significativa sul risultato finale. In dettaglio è possibile attribuire alle celle un fattore di riduzione areale (ARF – Area Reduction Factor) o lineare (WRF – Width Reduction Factor). Attraverso l'impostazione di dette variabili è possibile simulare l'effetto di riduzione della capacità di invaso o l'ostruzione al flusso dovuta ad edifici od altri elementi presenti sulla floodplain.

Nel caso in oggetto non sono stati impostate ARF e WRF.

k) Identificazione di altri attributi della floodplain (strade, argini ed infiltrazione)

Altri elementi di incidenza nella simulazione sono le strade, gli argini ed il coefficiente di infiltrazione. Ad esempio una strada può funzionare come sistema preferenziale di deflusso, per questo motivo può essere inserita specificandone la geometria per ogni cella percorsa dalla strada stessa. Similarmente possono essere individuati anche argini o comunque qualsiasi struttura di contenimento dei deflussi che può essere costituita da rilevati stradali, mura ed ogni struttura lineare più o meno direzionata lungo la direzione dell'asse fluviale o la linea principale di scorrimento della piena che può essere sormontata dai livelli idrici.

Infine, soprattutto in ambito urbano è ricorrente l'individuazione di aree impermeabili, per questo motivo FLO-2D è in grado di simulare il fenomeno di infiltrazione utilizzando il metodo Green-Ampt o il metodo SCS Curve Number.

Nel progetto in esame non sono stati utilizzati parametri ulteriori per definire aspetti aggiuntivi della simulazione.

l) Esportazione dei risultati

Nell'ambito del presente lavoro è stata utilizzato il modulo MAPPER, mediante il quale sono stati estrapolati gli identificativi delle celle inondate per ogni tempo di ritorno ed i valori del tirante idrico massimo di ogni cella; da ciò è stato possibile ricavare il volume di inondazione.

3) RISULTATI

3.1) COMPARAZIONE DEI DTM

I risultati della modellazione tridimensionale dell'area di studio consentono di effettuare una comparazione diretta tra il DTM ricavato dal procedimento fotogrammetrico di cui al capitolo 2.3 ed il LiDAR della medesima area rilevato nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento del Ministero dell'Ambiente.

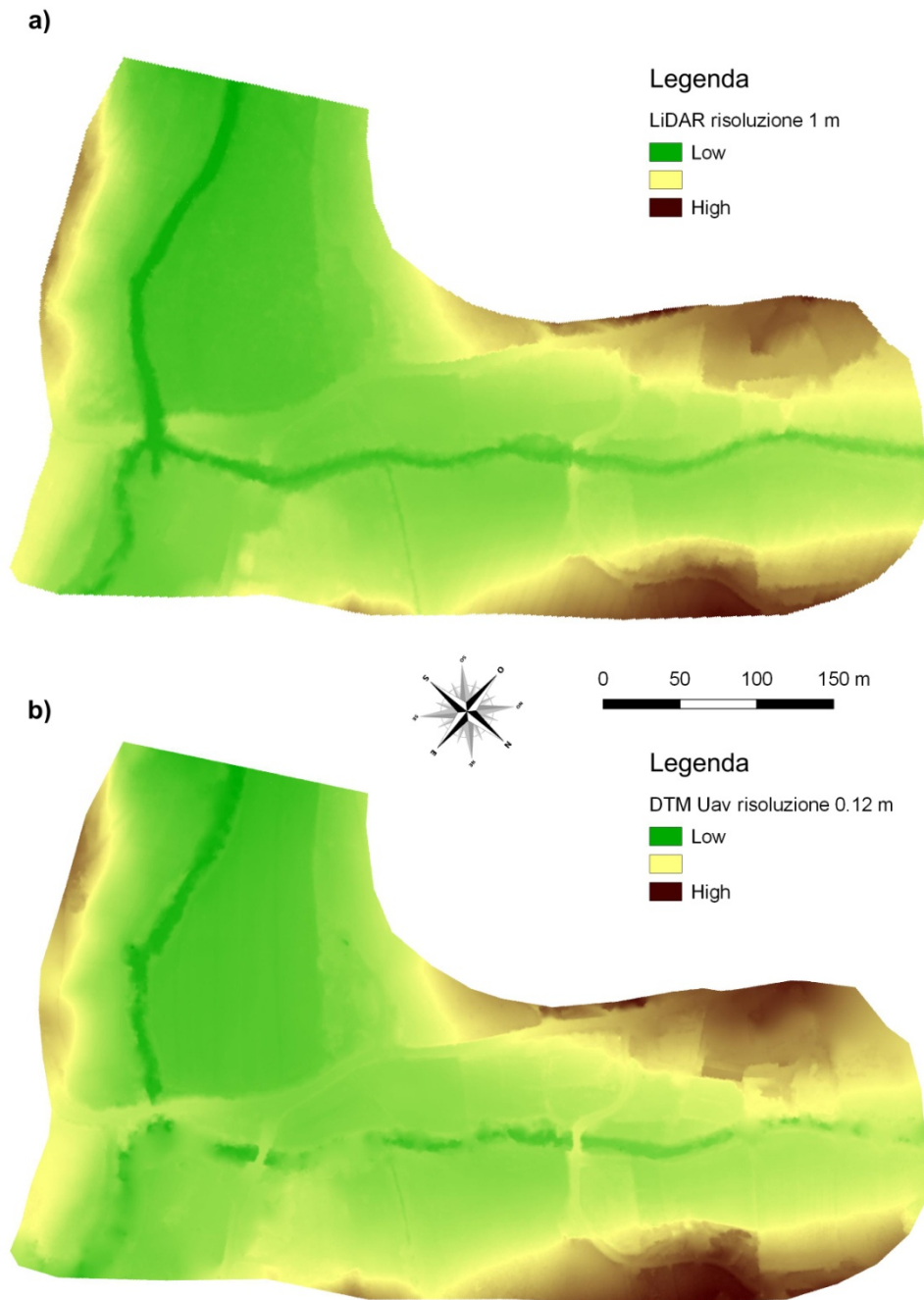


Figura 3.1 confronto dei DTM, a) in alto il LiDAR, b) in basso il raster ottenuto tramite rilievo con UAV.

Dal confronto delle immagini in figura 3.1 si evince che la vegetazione posta in alveo sia un elemento limitante nella creazione del DTM da UAV in quanto la mancanza di punti sotto chioma nelle zone coperte da vegetazione densa comporta in questo caso la mancata ricostruzione di una parte dell'alveo.

Ulteriore elemento di attenzione è certamente la ricostruzione dei ponti che attraversano il fosso in esame e che vengono puntualmente ricostruiti dal DTM da UAV mentre nel LiDAR questo tipo di informazione è persa. In effetti la viabilità è meno evidenziata e si interrompe in corrispondenza dell'alveo. E' ipotizzabile che detta informazione sia presente nel DSM e poi filtrata nella restituzione finale del DTM.

Al fine di apprezzare maggiormente le differenze dei due DTM nella figura 3.2 viene illustrato il raster ottenuto dalla sottrazione DTM UAV – LiDAR. Per effettuare ciò è stato necessario ridurre la risoluzione del primo pari a 0.12 m/pixel, sino a quella del Lidar pari a 1 m/pixel.

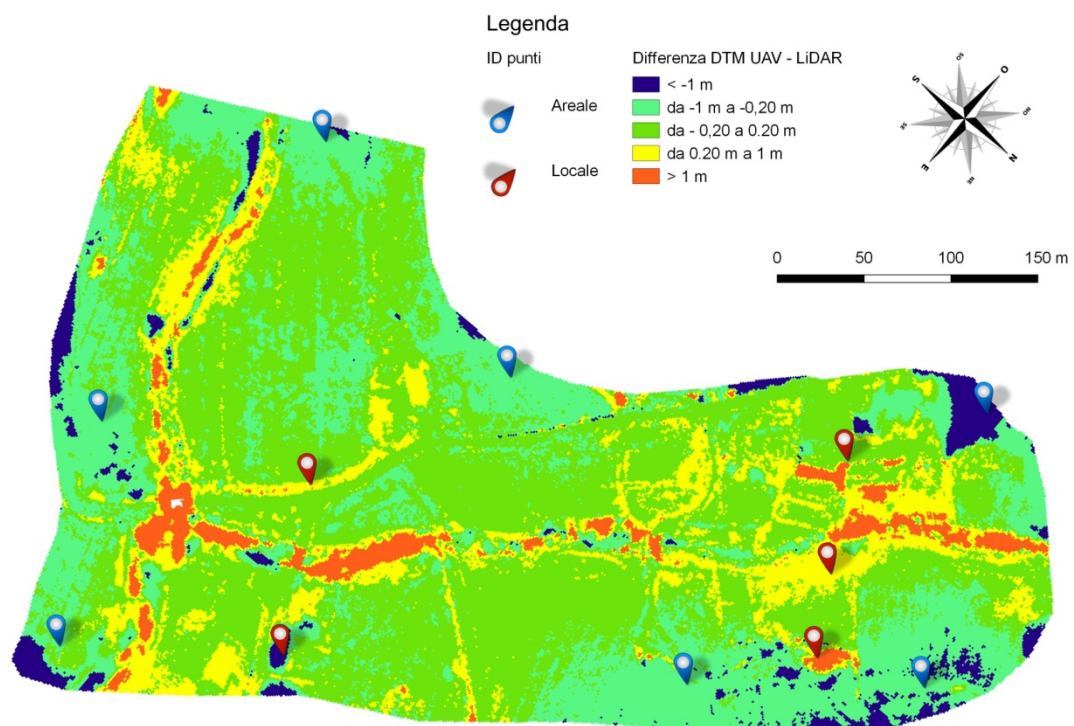


Figura 3.2 differenza tra il DTM da UAV ed il LiDAR

Nella figura precedente le differenze vengono classificate in cinque classi, le categorie < -1 m e > 1 m indicano valori molto distanti dalla quota LiDAR. Le restanti 2 classi a decrescere indicano valori mediamente distanti quando sono compresi nell'intervallo da -1 m a -0,20 m ed omologo positivo. Infine la categoria centrale

comprende tutti i punti che si discostano dal LiDAR di ± 0.20 m, per i quali nell'ambito del presente studio si può ritenere che il valore sia poco distante.

Escludendo alcuni piccoli tratti limitrofi all'alveo dei corpi idrici, i valori molto distanti negativi si rilevano essenzialmente nelle zone periferiche del modello e sono solitamente accompagnate da un'ampia area anch'essa depressa rispetto al LiDAR, tali zone sono indicati con segnaposto *Areale*.

La disposizione e la conformazione areale di questi punti induce a ritenere che la differenza derivi da una scarsa sovrapposizione laterale delle immagini elaborate che ha prodotto una distorsione delle foto ed un matching non sufficientemente accurato.

Viceversa le aree con valori molto distanti positivi sono in larga parte riconducibili alle zone di alveo dove la ricostruzione fotogrammetrica soffre l'interferenza della vegetazione che proprio in alveo è più rigogliosa e densa.

Nelle zone libere da vegetazione arborea della floodplain prevalgono valori poco distanti quindi con differenze contenute in un range di ± 0.20 m. Tuttavia in alcune zone, indicate con segnaposto locale, si rinvenivano ambiti in cui la differenza altimetrica è anche maggiore di 1 m.

In alcuni casi si tratta di anomalie dovute alla presenza di aree urbanizzate, manufatti o sistemazioni del terreno in prossimità della viabilità. Anche in questo caso, in presenza di fitta vegetazione, soprattutto in corrispondenza della viabilità e di ruderi, la ricostruzione può risultare meno accurata includendo nella classificazione Ground della dense cloud, punti che non rappresentano la quota a terra.

Dalla consultazione dei dati statistici e dell'istogramma successivo nella figura 3.3, si evince che la distribuzione sia leggermente spostata nel semiasse negativo.

Superficie	media	Deviazione standard
136.480 m ²	0,062	0,64

Tabella 3.1 sintesi dei dati statistici del raster della differenza DTM da UAV e LiDAR

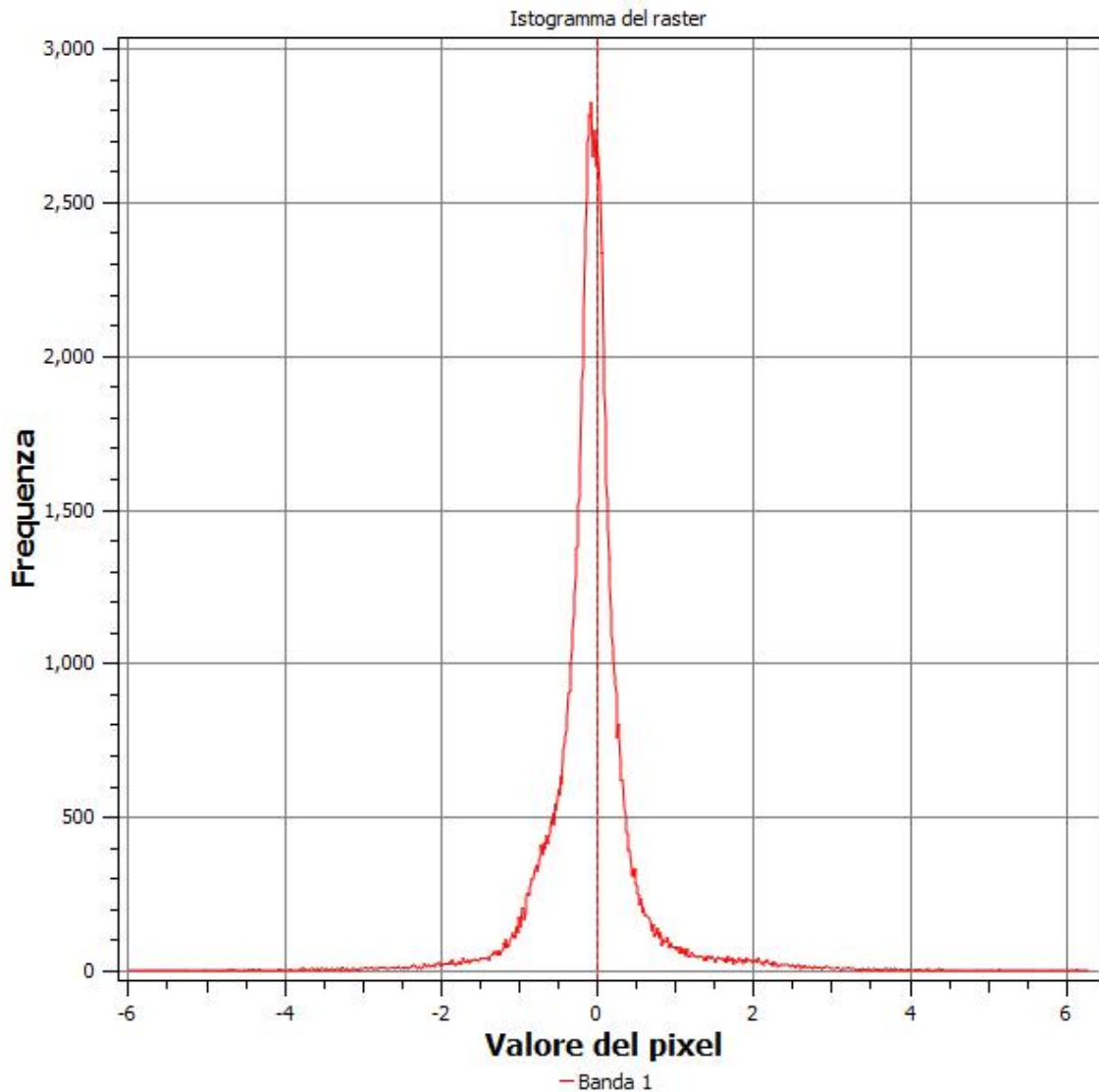


Figura 3.3 istogramma del raster della differenza tra il DTM da UAV ed il LiDAR

L'istogramma della distribuzione, chiaramente evidenzia la maggior frequenza di valori nella zona compresa tra + 1 e -1 m.

L'istogramma evidenzia altresì la presenza di outliers con bassa frequenza che rappresentano sostanzialmente errori grossolani dislocati nella zona esterna dell'area di studio come apprezzabile nella figura 3.2.

Considerando la variabilità delle differenze di quota rispetto alla natura della copertura del suolo, può essere interessante effettuare una comparazione dei principali indici statistici classificati in funzione della copertura del suolo come rilevata nella fase di attribuzione dei coefficienti di scabrezza nel paragrafo 2.4.2 i.

Copertura del Suolo	Superficie	media	Deviazione standar
Agricolo	89450	-0.16	0.39
Forestale	5430	-0.30	0.96
Urbano	24851	0.03	0.68
Canale	16749	0.53	0.95

Tabella 3.2 sintesi dei dati statistici del raster della differenza DTM da UAV e LiDAR scomposti per la tipologia di copertura del suolo

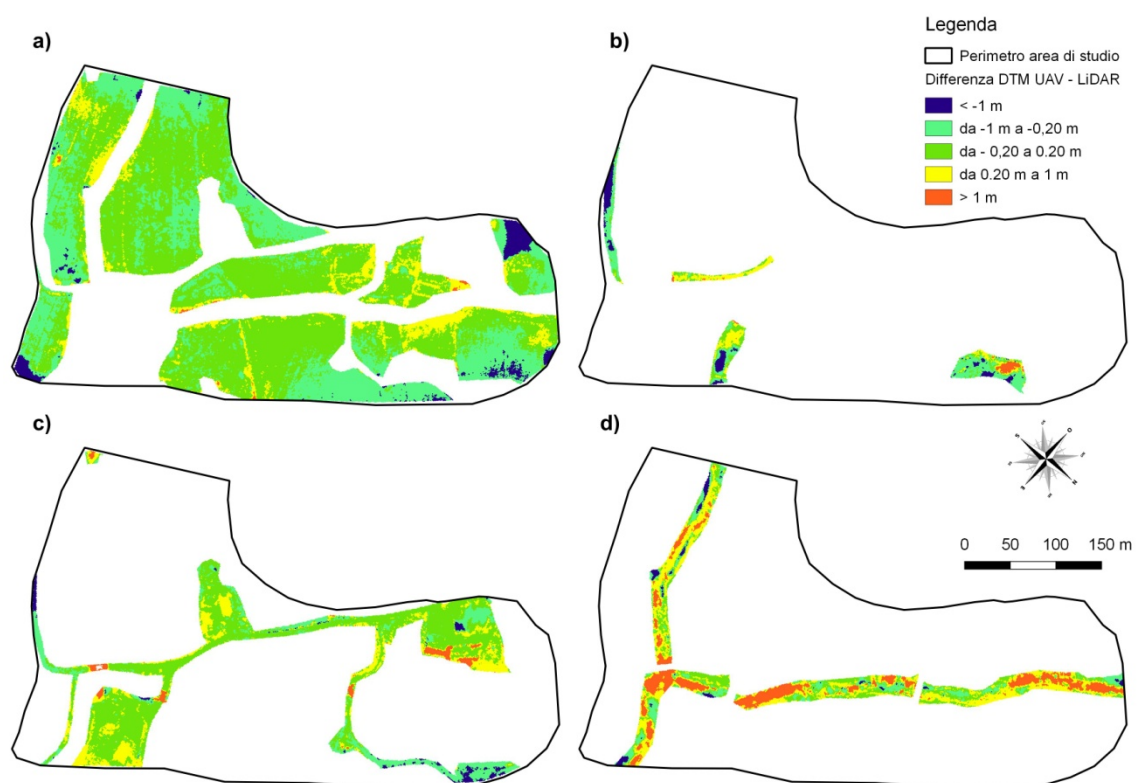


Figura 3.4 raster delle differenze scomposto per copertura del suolo, a) Agricolo, b) forestale, c) Urbano, d) Canale

Dalla consultazione della tabella e delle immagini della figura 3.4 si evince che le maggiori difficoltà si abbiano in corrispondenza dell'alveo come ragionevolmente ci si poteva aspettare. I risultati della aree agricole sono soddisfacenti salvo nelle zone marginali dove a fronte di una media piuttosto bassa, le differenze possono assumere valori prossimi al metro, la deviazione standard comunque contenuta è prossima ai valori ritenuti poco distanti

L'area urbana è maggiormente contesa in quanto alcune aree, ad esempio strade e piazzali, per la loro natura e conformazione sono ben ricostruite e pertanto

giustificano una media bassa, tuttavia in prossimità di manufatti o ruderi e relative aree di corte, possono apprezzarsi differenze molto maggiori che implicano una deviazione standard maggior e rispetto all'area agricola.

L'area forestale per la propria natura somiglia molto alla situazione rilevabile nel canale, la deviazione standard affine ne è la conferma.

La successiva fase di elaborazione finalizzata alla produzione delle mappe di allagabilità prevede la creazione della grid per la simulazione idraulica. Dovendo effettuare un'interpolazione dei dati altimetrici fino ad ottenere la risoluzione spaziale della grid quadrata di 10 m, allo stesso modo di quanto già effettuato sul raster con risoluzione 1 m, può essere effettuata una comparazione tra i due grid di calcolo, ciò consente di apprezzare le effettive differenze altimetriche del dominio che possono influenzare la simulazione idraulica al termine del processo.

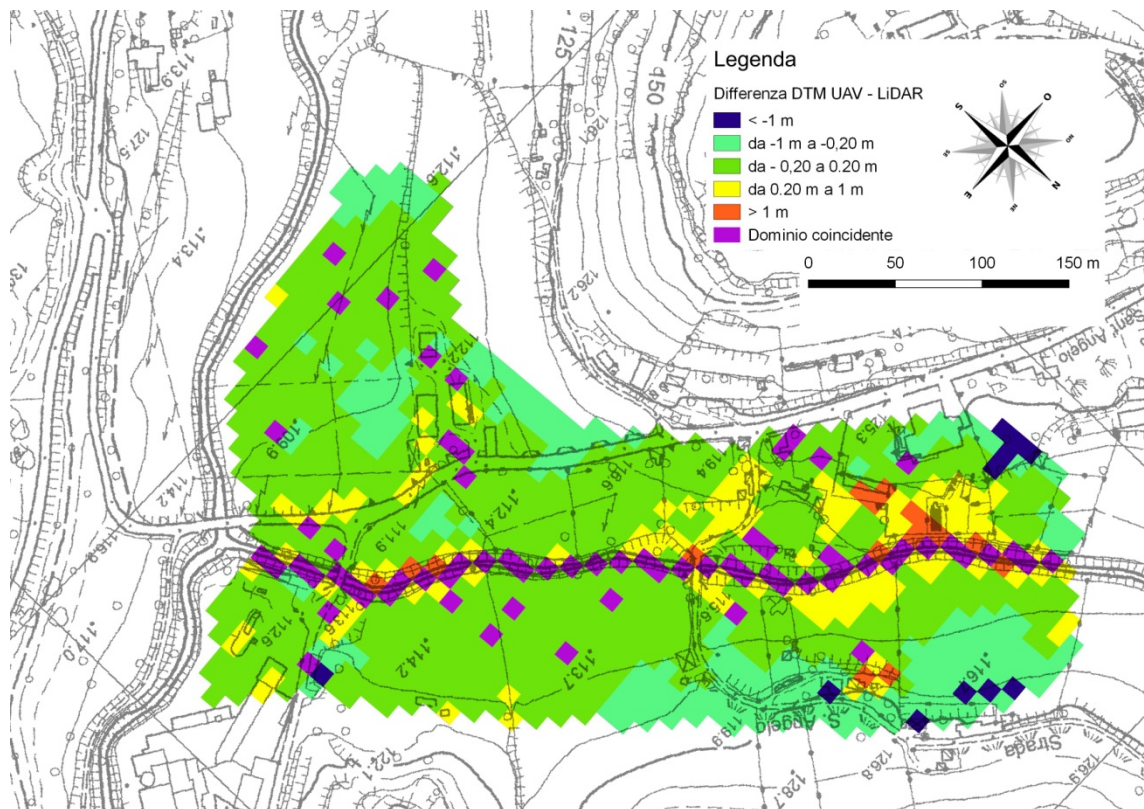


Figura 3.5 raster delle differenze delle grid del dominio di calcolo con maglia 10 m per lato utilizzati per il modello idraulico Flo2D

Come prevedibile il risultato evidenzia in generale un armonizzazione delle differenze che tendono a ridursi come si apprezza dalla tabella sottostante, anche se tuttavia deve essere tenuto conto che l'area di simulazione termina sulla sponda destra del Fiume Marta dove è identificata la zona di out flow del modello di simulazione,

mentre il modello raster comprendeva anche una parte della floodplain sulla sponda sinistra del Fiume Marta.

Superficie	media	Deviazione standar
89.800 m ²	0,019	0,24

Tabella 3.3 sintesi dei dati statistici del vettore di differenza tra il grid UAV e LiDAR

Anche l'istogramma, avuto riguardo delle differenze di superficie a cui si riferisce, evidenzia in generale una riduzione della zona in cui si registrano i valori più alti di distribuzione.

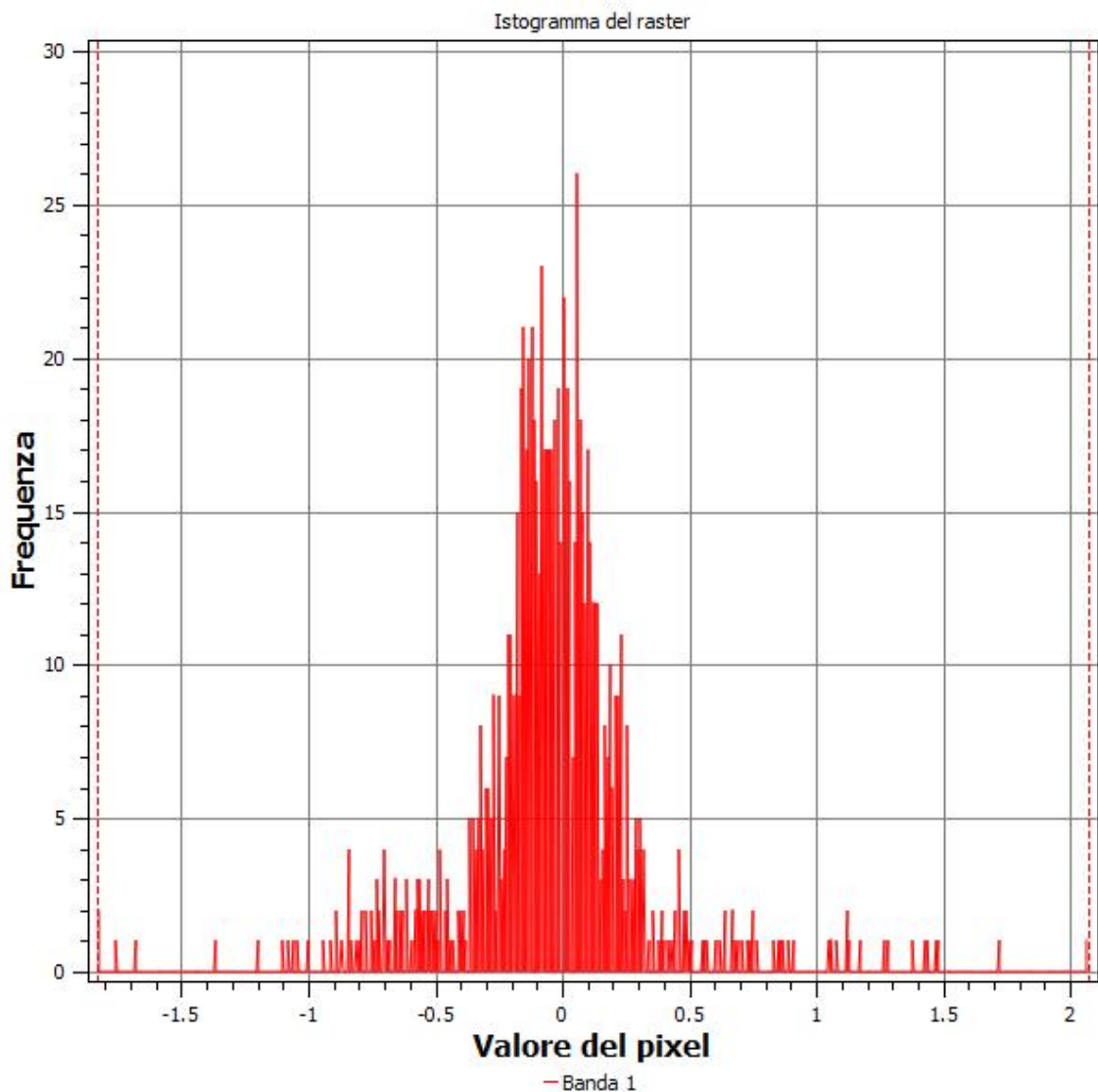


Figura 3.6 istogramma del raster della differenza tra il Grid associato al DTM da UAV ed il corrispondente LiDAR

L'istogramma evidenzia una frequenza piuttosto elevata nel range +/- 25 cm della popolazione.

3.2) MODELLISTICA IDROLOGICA: IDROGRAMMI DI PROGETTO DELL'ONDA DI PIENA

La modellistica idrologica ha prodotto per ogni tempo di ritorno un idrogramma di piena da utilizzare come input del modello idraulico bidimensionale descritto nel Capitolo precedente.

Adottando l'approccio della Formula Razionale sono stati determinati dapprima tutti i valori che compongono l'equazione per poter procedere al calcolo del valore della massima portata di piena.

Per l'esecuzione del calcolo il K_d è stato impostato ad un valore pari a 0.4, ipotizzando una permeabilità media del suolo.

Di seguito vengono riportati i valori classificati in funzione del relativo tempo di ritorno assegnato.

TR 10	Tr 10	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500
K_t	1.43	2.06	2.38	2.70	3.14
h_d	69.79	100.47	115.88	131.86	153.34
Z/L	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Z/Y	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
s₁	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
h₁	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00
E(H₁)	30.58	30.58	30.58	30.58	30.58
t_c	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
d	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
K_d	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
A	28.70	28.70	28.70	27.80	28.70
K_r	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Q (m³/s)	42.40	61.04	70.40	77.70	93.16

Tabella 3.4 Calcolo della portata massima per ciascun tempo di ritorno.

Successivamente, al fine di poter calcolare l'idrogramma di progetto, necessario per la simulazione idraulica all'interno del software FLO2D, vengono determinate le diverse fasi, già esplicitate in precedenza, quale ramo ascendente, segmento di colmo e

ramo discendente. Per effettuare ciò, sono stati attribuiti dei valori fissi, quali $Q_0=0$ e $k=0$, poiché il bacino oggetto di studio risulta avere una estensione minore di 100 Km^2 .

Nell'immagine di seguito vengono riportati in forma grafica gli idrogrammi di progetto ottenuti con la Formula Razionale per ciascun tempo di ritorno.

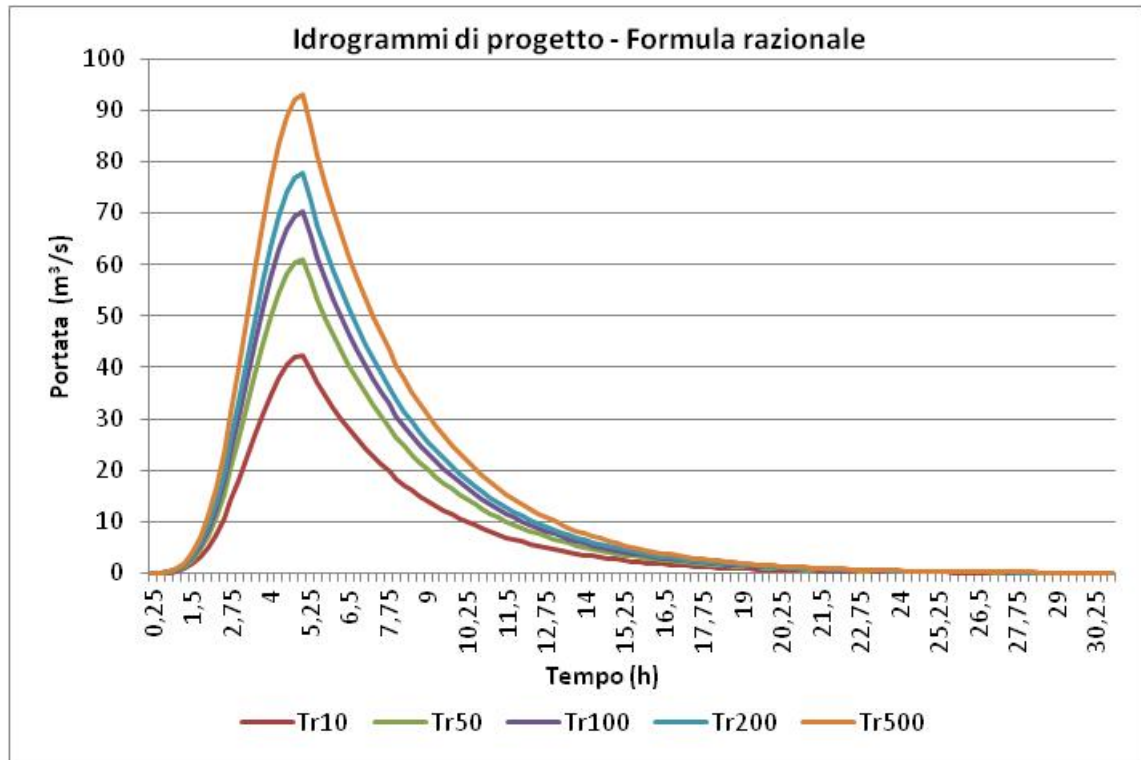


Figura 3.7 grafico degli idrogrammi di progetto dell'onda di piena per tutti i Tr (10, 50, 100, 200 e 500)

Analogamente a quanto descritto nel Capitolo 2, utilizzando i dati morfologici del bacino desunti dal DTM dell'Istituto Geografico Militare con risoluzione 20 m, attraverso l'utilizzo del software EBA4SUB (Piscopia R., Petroselli A., Grimaldi S., 2015) è stato possibile effettuare tutti i calcoli e le determinazioni sino all'ottenimento degli idrogrammi di progetto dell'onda di piena.

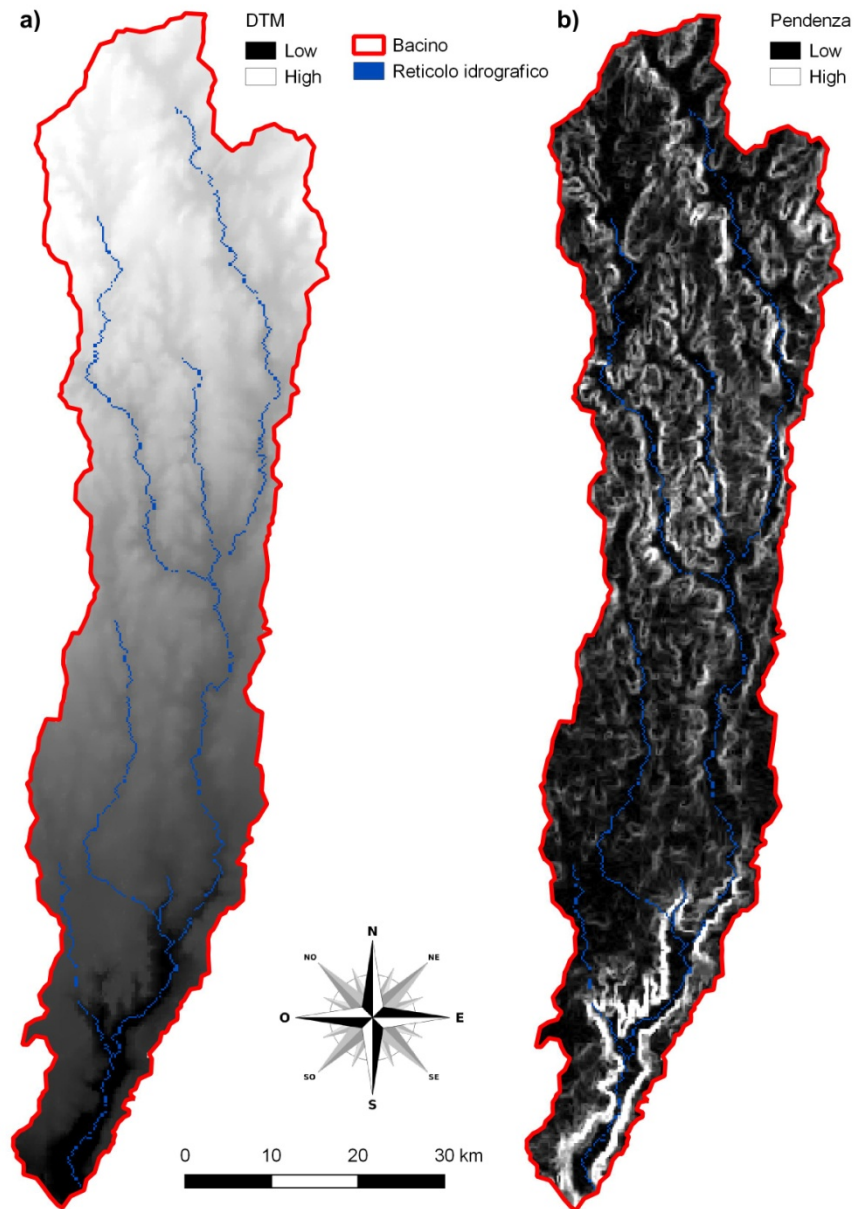


Figura 3.8 illustrazione del bacino idrografico di riferimento, a) il modello DTM dell'IGM con risoluzione 20 m ed il reticolo idrografico superficiale, b) carta delle pendenze

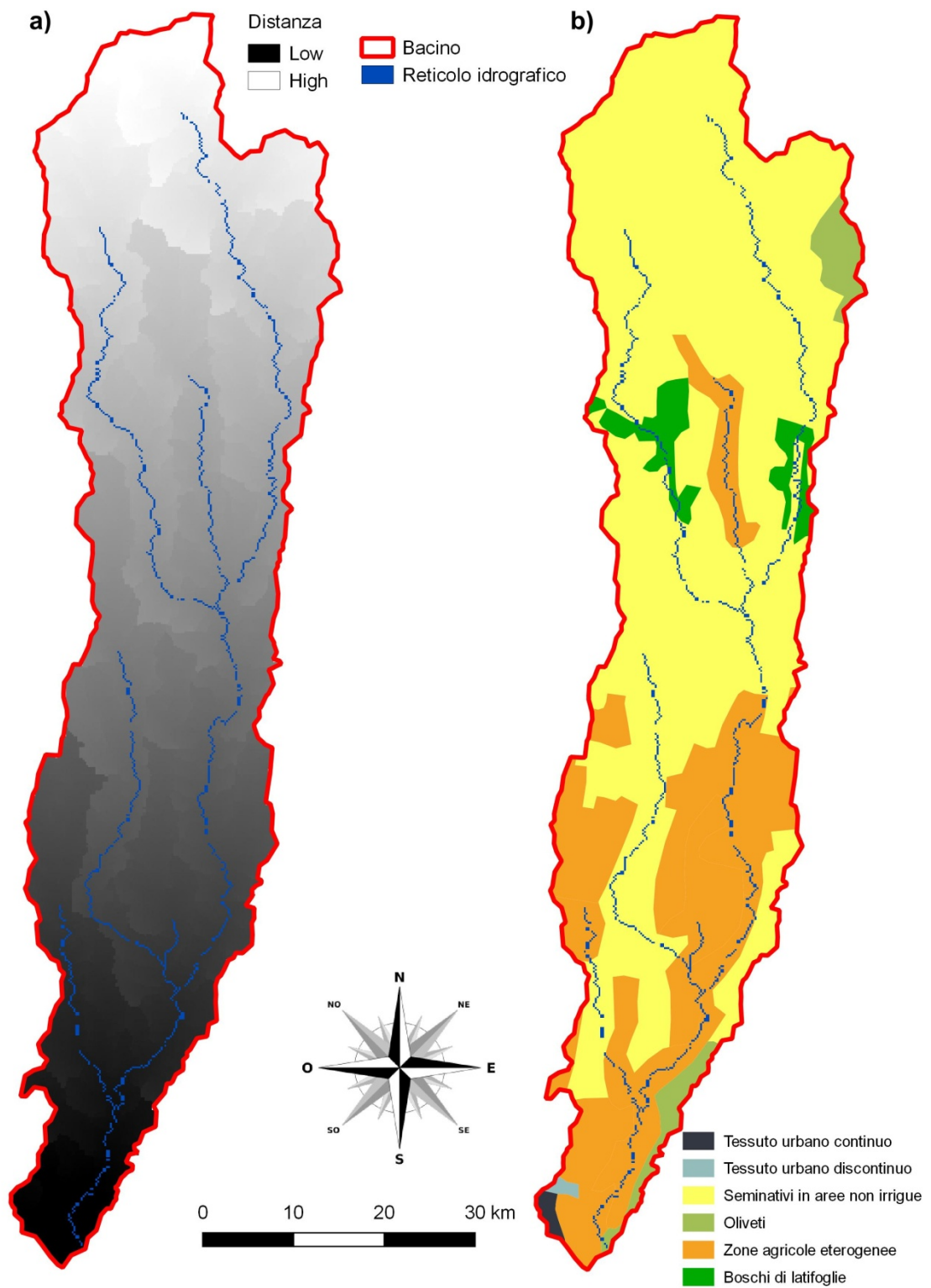


Figura 3.9 illustrazione del bacino idrografico di riferimento, a) raster della distanza di un punto generico dalla sezione di uscita del bacino, b) Carta dell'uso del suolo

Di seguito viene riportato in forma grafica l'idrogramma di progetto per ciascun tempo di ritorno.

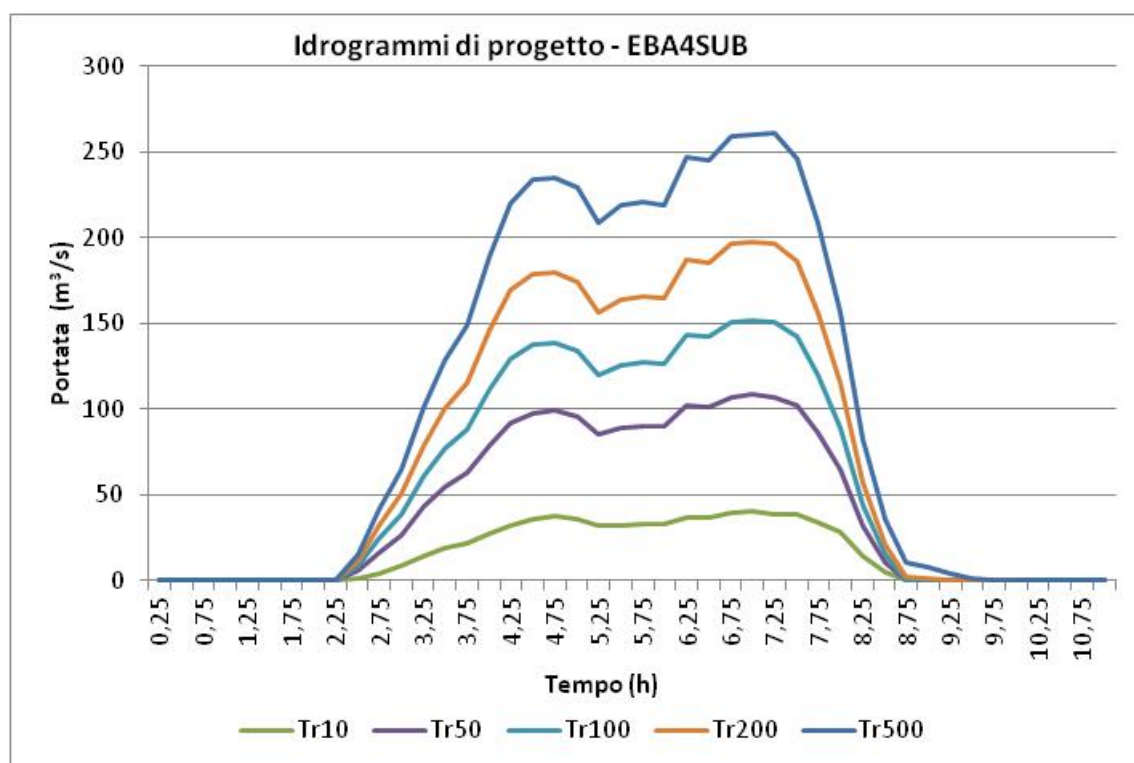


Figura 3.10 grafico degli idrogrammi di progetto dell'onda di piena per tutti i Tr (10, 50, 100, 200 e 500)

Dal confronto degli idrogrammi si evince in maniera inequivocabile che l'utilizzo del modello avanzato EBA4SUB comporta una stima delle portate e dei volumi nettamente maggiore rispetto agli idrogrammi determinati con la formula razionale soprattutto nei Tr da 100 a 500. Viceversa al Tr 10 la stima della massima portata è maggiore nella formula razionale seppur in maniera molto contenuta.

Inoltre anche la forma dell'idrogramma e la durata dello stesso assumono caratteristiche proprie che derivano dalla natura del bacino idrografico, viceversa l'idrogramma della Formula Razionale evidenzia un andamento esponenziale con un breve picco che altrettanto rapidamente decresce.

Chiaramente, oltre alla diversità dei valori propri di portata massima, anche la durata evidenzia una significativa differenza che può ripercuotersi anche sui risultati delle successive simulazioni idrauliche.

3.3) DETERMINAZIONE DELL'AREA DI ESONDAZIONE

L'applicazione del modello idraulico per la determinazione delle aree di esondazione e conseguentemente delle mappe di allagabilità ha anzitutto prodotto il modello altimetrico composto da celle quadrate di lato pari a 10 m.

Tale risultato deriva dall'interpolazione dei DTM utilizzati e dalla scelta della dimensione della cella avuto riguardo del tempo computazionale e dei limiti del modello idraulico considerato.

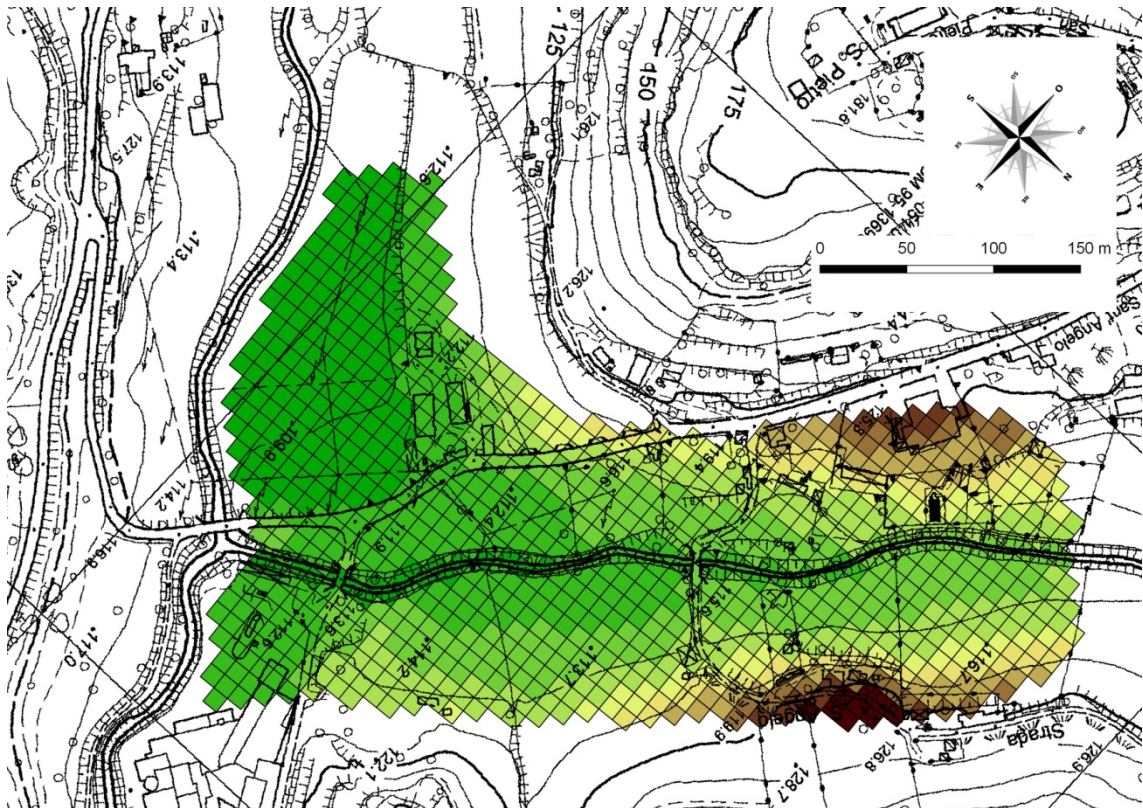


Figura 3.11 illustrazione del dominio di calcolo costituito da una griglia di celle quadrate aventi lato di 10 m

Gli idrogrammi ottenuti applicando i modelli idrologici descritti nel Capitolo 2 e riportati nel Capitolo 3.1 sono stati veicolati nei modelli morfologici, il primo derivante dal DTM LiDAR ed il secondo derivante dal DTM da UAV.

Di seguito viene riportata l'illustrazione tridimensionale di un modello morfologico utilizzato per la simulazione.

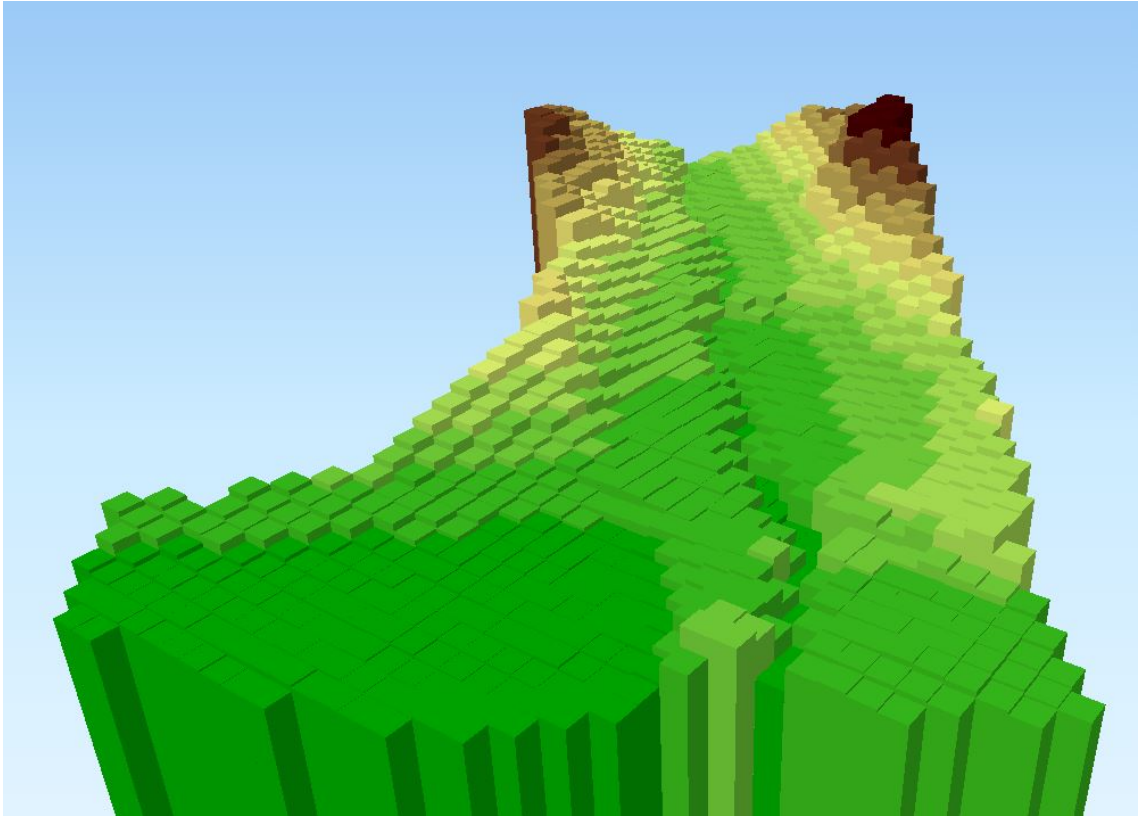


Figura 3.12 illustrazione tridimensionale del dominio di calcolo ottenuto per estrusione della griglia.

Altri fattori importati della simulazione sono dati dal profilo dell'alveo dato dalla sua sezione longitudinale la quale è stata mantenuta in tutte le simulazioni costante.

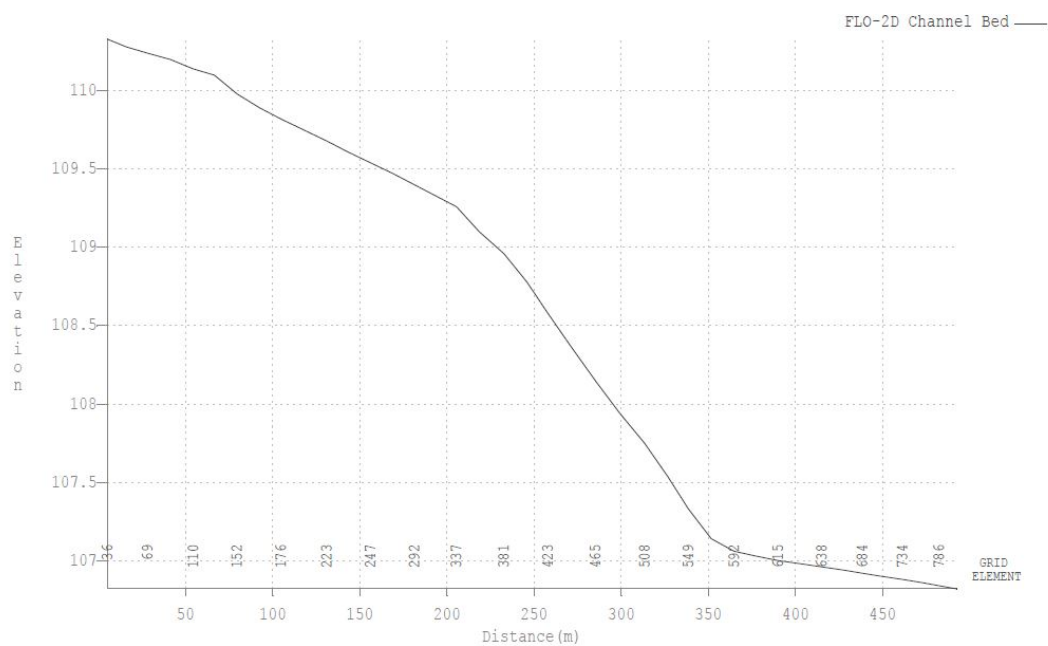


Figura 3.13 particolare del profilo dell'alveo opportunamente allineato per garantire la continuità idraulica, il profilo evidenzia una pendenza del fondo di circa l'1%.

I coefficienti di scabrezza sono stati impostati avuto riguardo della mappa dell'uso del suolo riportata di seguito.

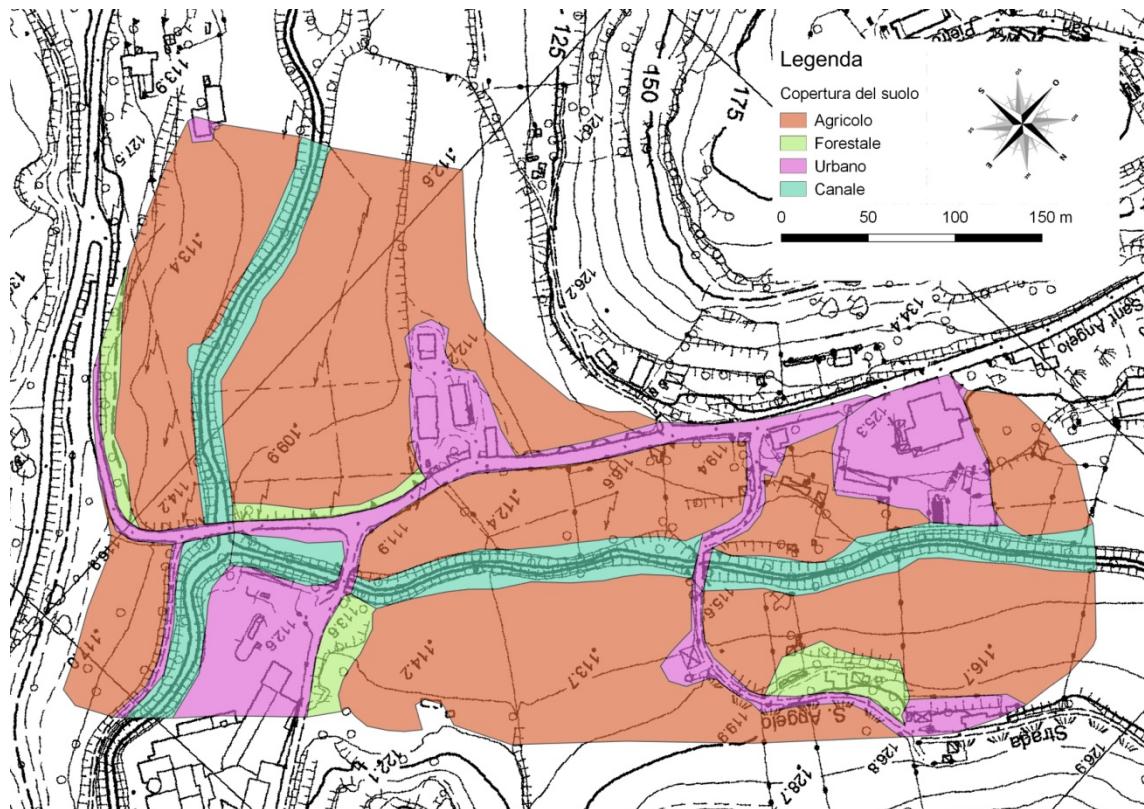


Figura 3.14 particolare della suddivisione della copertura del suolo per l'attribuzione del coefficiente di scabrezza.

L'analisi idraulica è stata condotta impostando 4 configurazioni derivanti dalle possibili combinazioni delle variabili disponibili costituite dal diverso procedimento di determinazione dell'idrogramma e dal diverso dominio morfologico ottenuto interpolando i due DTM in oggetto, il LiDAR e quello da UAV.

Gli idrogrammi a confronto sono stati ottenuti adottando il modello EBA4SUB in un caso ed il modello della Formula Razionale nell'altro.

Di seguito vengono riportate le configurazioni realizzate.

Configurazione	Idrogramma	DTM
<i>FR-LID</i>	<i>Formula Razionale</i>	<i>LiDAR</i>
EBA-LID	EBA4SUB	LiDAR
FR-UAV	Formula Razionale	DTM da UAV
EBA-UAV	EBA4SUB	DTM da UAV

Tabella 3.5 configurazioni adottate per le simulazioni

Hai fini delle successive comparazioni la combinazione **FR-LID** sarà considerata come “Configurazione di Riferimento” in quanto rappresentante l’effettiva metodologia più largamente adottata attualmente negli studi idraulici.

Le possibili combinazioni per i Tempi di ritorno utilizzati 10, 50, 100, 200 e 500, hanno prodotto complessivamente 20 simulazioni da cui sono state ricavate altrettante mappe di allagabilità.

Nella tabella di seguito e nel grafico successivo vengono riassunti i risultati delle suddette simulazioni ordinate in funzione della configurazione e del tempo di ritorno.

Superficie allagata ($m^2 \times 100$)	Configurazioni	LiDAR		DTM UAV	
		Formula Razionale	EBA4SUB	Formula Razionale	EBA4SUB
		FR-LID	EBA-LID	FR-UAV	EBA-UAV
	Tempi di ritorno				
	TR10	51	48	41	41
	TR50	124	428	144	450
	TR100	233	503	304	515
	TR200	278	560	345	554
	TR500	362	593	404	601

Tabella 3.6 aree allagate risultati dalle simulazioni

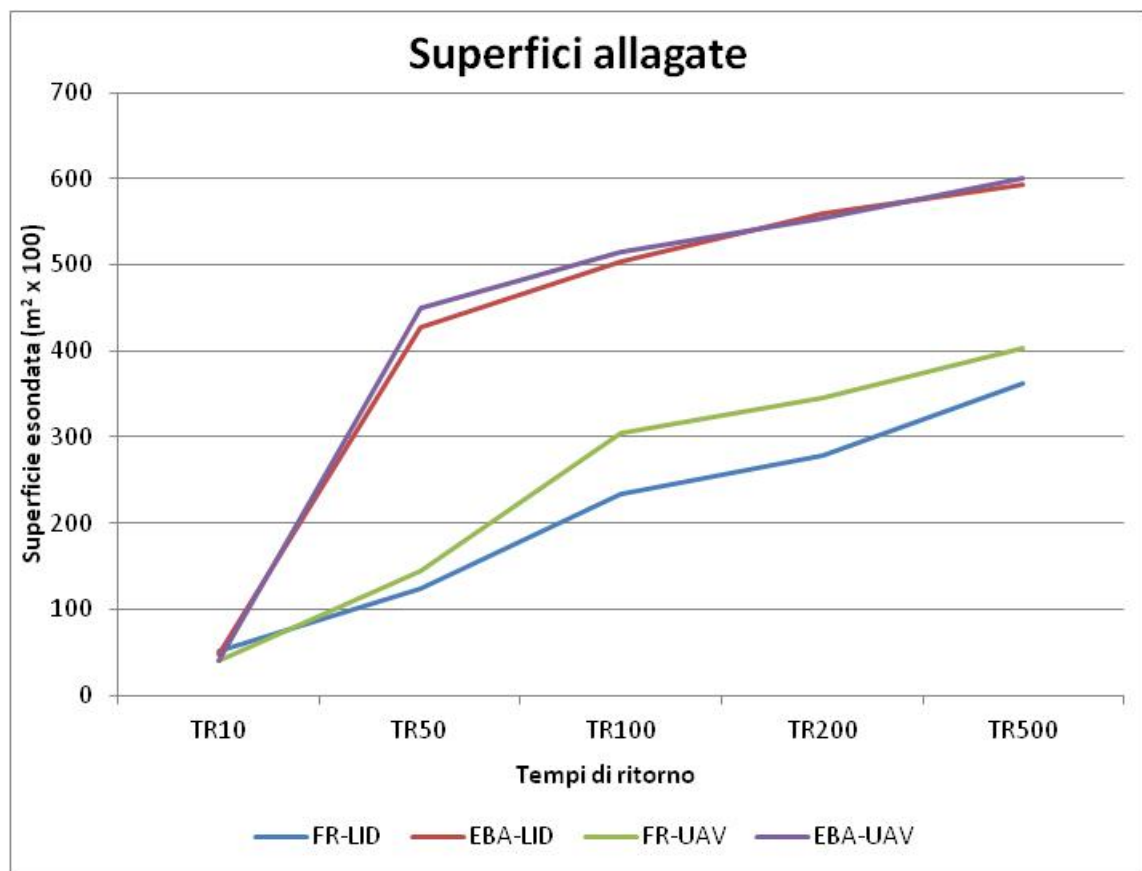


Figura 3.15 grafico delle superfici allagate per tutti i Tr e per tutte le configurazioni.

Il grafico delle superfici allagate mostra anzitutto come le superfici differiscano molto in funzione dell'idrogramma utilizzato, è pertanto a questa variabile che deve essere imputata la variazione principale.

Utilizzando l'idrogramma EBA le superfici allagate sono sempre più grandi, in particolar modo al Tr 50 dove la differenza è massima, mentre restano simili al Tr 10. Negli altri Tr 100, 200 e 500 il divario rimane pressoché costante con la configurazione di riferimento che rimane la più contenuta in termini di superficie allagata.

Il grosso divario che si origina al Tr50 è essenzialmente dovuto alla grande differenza tra la portata massima in uscita dall'idrogramma di progetto che passa dai circa $60 \text{ m}^3/\text{s}$ della Formula Razionale agli oltre $100 \text{ m}^3/\text{s}$ della metodologia EBA4SUB.

Nei Tr successivi l'incremento di superficie allagata delle configurazioni che utilizzano EBA e quindi EBA-LID e EBA-UAV, si assottiglia molto in quanto gran parte della floodplain è ormai già allagata e l'ulteriore incremento delle superfici impone incrementi del tirante idrico importati e conseguentemente dei volumi come si vedrà meglio nel grafico successivo.

Infine è debito evidenziare una modesta seppur rilevabile differenza tra le configurazioni che adottano lo stesso idrogramma della Formula Razionale. In dettaglio il risultato della configurazione FR-UAV evidenzia superfici maggiori soprattutto ai Tr 100, 200 e 500 rispetto al riferimento FR-LID. In minor misura si rilevano al Tr 50 mentre al Tr 10 la situazione è ribaltata seppur con valori contenuti.

Tali differenze sono chiaramente imputabili al diverso DTM utilizzato. In dettaglio tale variazione è da imputarsi alla presenza di aree moderatamente più basse rispetto al LiDAR che vengono inondate seppur con un tiranti contenuti.

Man mano che la floodplain si riempie tale differenza va assottigliandosi in conseguenza di una morfologia che rapidamente sale di quota. Allo stesso modo nella serie con idrogramma EBA4SUB tale effetto è visibile in minor misura al Tr 50, il quale già comporta superfici ben più ampie rispetto alla coppia omologa con Formula Razionale. Come riportato in precedenza, nei Tr successivi i valori sono essenzialmente sovrapposti.

Rispetto alla condizione di riferimento, tutte le altre configurazioni comunque producono una superficie inondata maggiore.

In termini di volumi esondati le simulazioni effettuate hanno prodotto i seguenti risultati in forma tabellare e successivamente nel grafico della figura 3.16.

Volume esondato ($\text{m}^3 \times 100$)	Configurazioni	LiDAR		DTM UAV	
		Formula Razionale	EBA	Formula Razionale	EBA
		FR-LID	EBA-LID	FR-UAV	EBA-UAV
	Tempi di ritorno				
	TR10	121.88	119.19	117.49	115.19
	TR50	172.41	383.27	164.9	398.65
	TR100	208.32	520.15	222.73	544.88
	TR200	240.46	640.86	269.69	671.55
	TR500	314.02	782.78	346.67	818.27

Tabella 3.7 volumi esondanti risultati dalle simulazioni

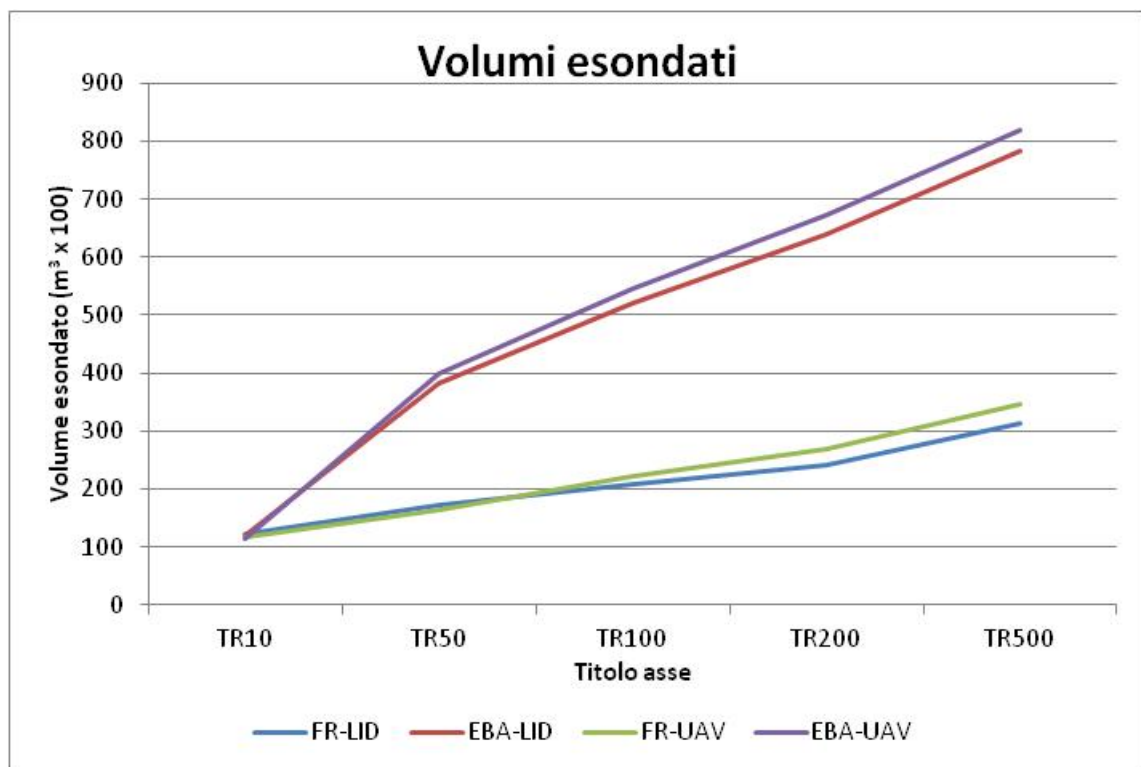


Figura 3.16 grafico dei volumi esondati per tutti i Tr e per tutte le configurazioni.

I volumi esondati mostrano un andamento simile alle superfici allagate in merito alla significativa differenza tra le configurazioni FR-LID e FR-UAV rispetto alla EBA-LID e EBA-UAV. Anche in questo caso la variabile che produce la maggior differenza tra le simulazioni è certamente l'idrogramma adottato.

Viceversa la differenza indotta dall'utilizzo dei diversi DTM si concretizza in un leggero incremento dei volumi esondati che cresce proporzionalmente al Tr considerato, dal Tr 50 con idrogramma EBA4SUB e dal Tr1 100 con idrogramma della Formula Razionale.

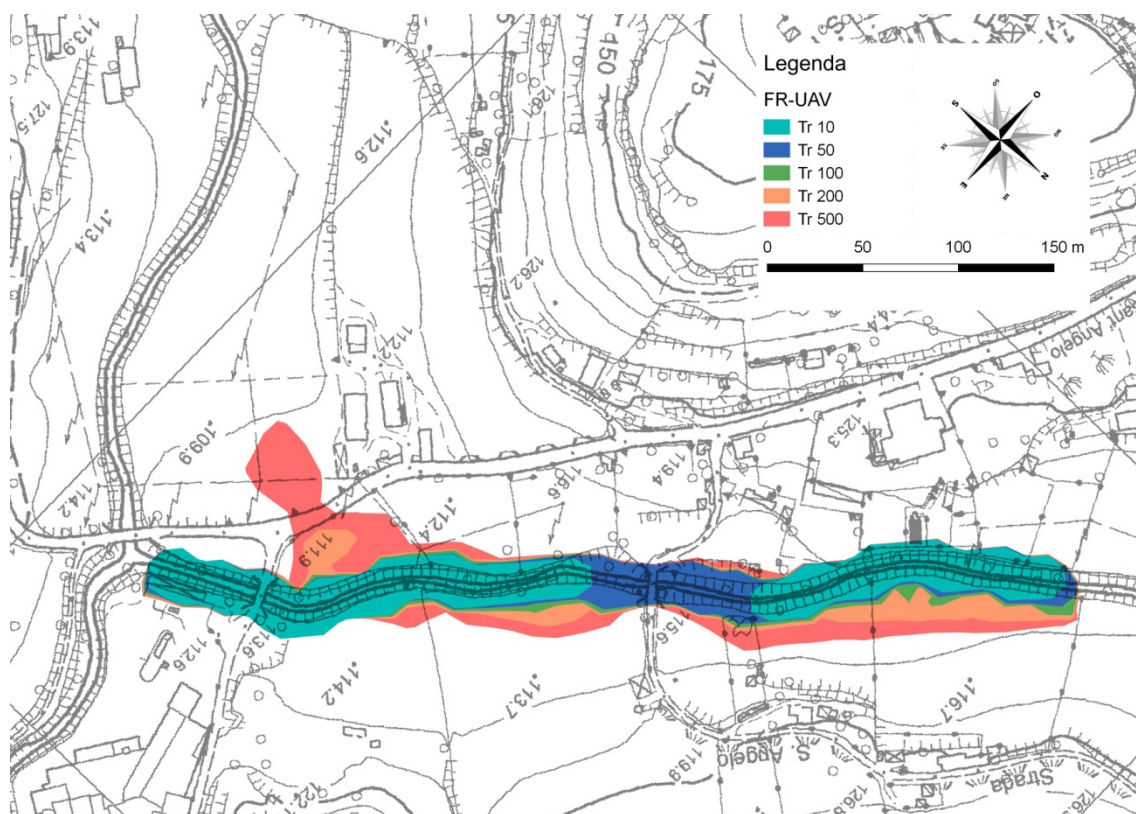


Figura 3.19 mappa di allagabilità derivata utilizzando la configurazione FR-UAV.

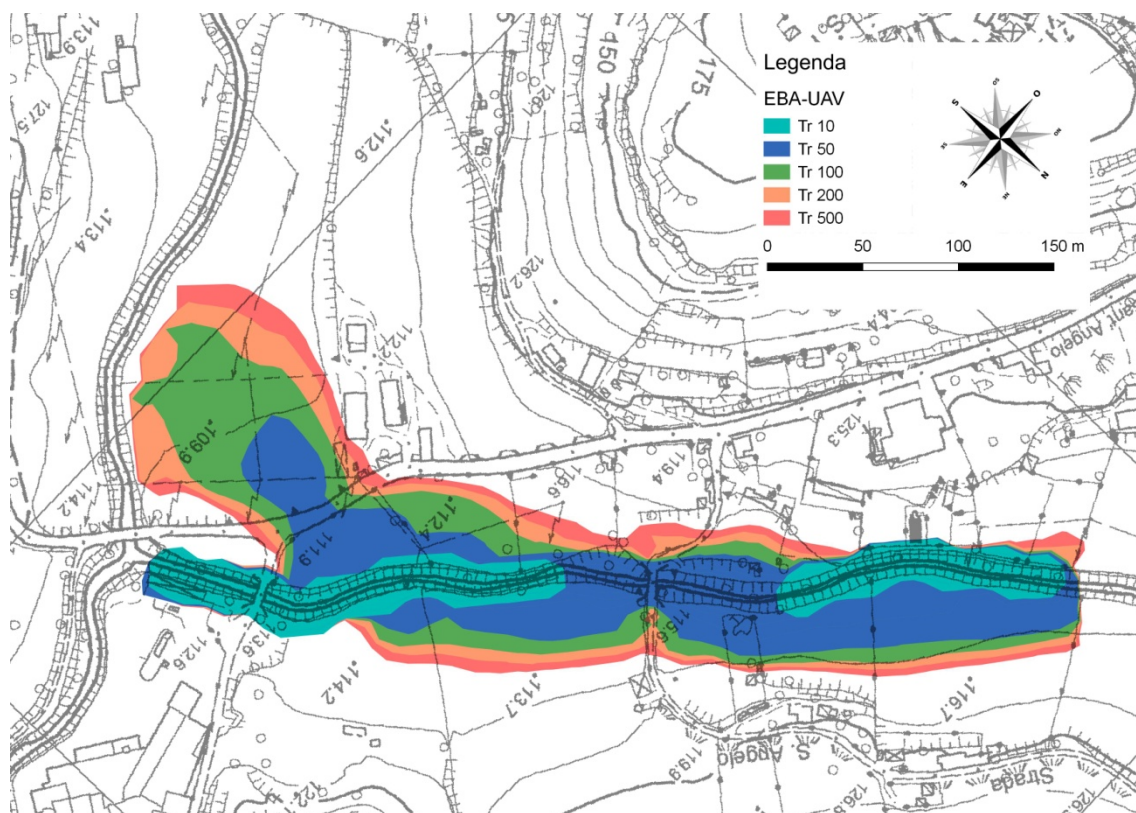


Figura 3.20 mappa di allagabilità derivata utilizzando la configurazione EBA-UAV.

La visualizzazione delle mappe conferma la differenza indotta dalla variabile idrogramma. Ciò che si apprezza maggiormente dalle mappe è la grande superficie che viene immediatamente allagata al Tr 50 con gli idrogrammi EBA, mentre nei successivi ciò che rileva maggiormente è l'incremento dei tiranti idrici, considerando che la superficie allagata non presenta importanti incrementi mentre i volumi crescono proporzionalmente al tempo di ritorno.

Al fine di apprezzare le differenze in termini di tiranti idrici anche in rapporto alla superficie allagata, di seguito vengono riportati i risultati della differenza delle mappe di allagabilità tra la configurazione FR-LID di riferimento e le altre configurazioni secondo lo schema di seguito.

Configurazione		Riferimento
EBA-LID	-	FR-LID
FR-UAV	-	
EBA-UAV	-	

Tabella 3.8 elenco delle comparazione di configurazione

Per ogni comparazione di configurazione possono essere ottenute 5 mappe di differenza, nelle tabelle di seguito vengono riportati i risultati di tali differenze ed il relativo valore di variazione in termini percentuali rispetto al valore di riferimento, sia per le superfici allagate che per i volumi esondati.

Superficie allagata	Serie	(EBA-LID) - (FR-LID)	(FR-UAV) - (FR-LID)	(EBA-UAV) - (FR-LID)	(EBA-LID) - (FR-LID)/(FR-LID)	(FR-UAV) - (FR-LID)/(FR-LID)	(EBA-UAV) - (FR-LID)/(FR-LID)
	Tempo di ritorno	(x 100 m ²)					
	TR10	-3	-10	-10	-6%	-20%	-20%
	TR50	304	20	326	245%	16%	263%
	TR100	270	71	282	116%	30%	121%
	TR200	282	67	276	101%	24%	99%
	TR500	231	42	239	64%	12%	66%

Tabella 3.9 differenza delle serie sulle superfici allagate

Come già rilevato nel grafico della figura 3.15, non tutte le simulazioni hanno prodotto una differenza considerevole e comunque apprezzabile dalla mappa.

In primo luogo si rileva che per il Tr 10 la configurazione (EBA-LID) evidenzia valori molto prossimi al riferimento (FR-LID). Nelle configurazioni (FR-UAV) e (EBA-UAV) si apprezza una differenza del 20% che tuttavia interessa 1.000 m² di superficie in meno rispetto alla condizione di riferimento. Nel Tr 50 la serie (EBA-LID) e (EBA-UAV) evidenziano le differenze maggiori mentre nella serie (FR-UAV) la differenza è più modesta. Lo stesso andamento si registra anche per le serie successive seppur con valori diversi ma in percentuali simili.

Anche sui volumi esondati si rileva un andamento piuttosto simile a quanto descritto per le superfici. Al Tr 10 tutte le configurazioni sono inferiori rispetto al valore di riferimento, i valori sono simili. Nei Tr successivi dal Tr50 si hanno volumi esondati sensibilmente maggiori rispetto al riferimento ad eccezione della configurazione (FR-UAV) che viceversa rimane su differenze contenute, sovrapponibili con i risultati della simulazione di riferimento.

Volume esondato	Serie	(EBA-LID) - (FR-LID)	(FR-UAV) - (FR-LID)	(EBA-UAV) - (FR-LID)	(EBA-LID) - (FR-LID)/(FR-LID)	(FR-UAV) - (FR-LID)/(FR-LID)	(EBA-UAV) - (FR-LID)/(FR-LID)
	Tempo di ritorno	(x 100 m ³)					
	TR10	-3	-4	-7	-2%	-4%	-5%
	TR50	211	-8	226	122%	-4%	131%
	TR100	312	14	337	150%	7%	162%
	TR200	400	29	431	167%	12%	179%
	TR500	469	33	504	149%	10%	161%

Tabella 3.10 differenza delle serie sui volumi esondanti

Dai dati di cui sopra possono essere derivate altrettante mappe di differenza che meglio possono far apprezzare il contributo delle variabili alla determinazione delle aree di allagabilità e dei volumi esondati.

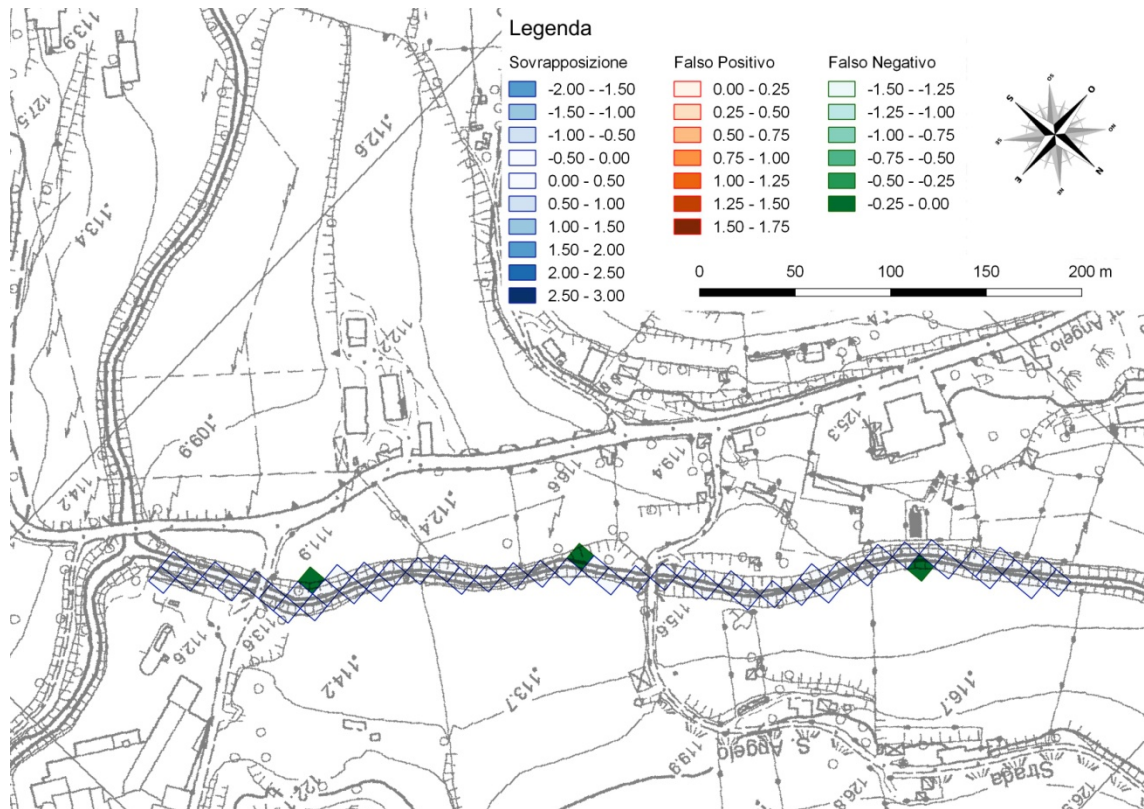


Figura 3.21 mappa della Serie (EBA-LID) - (FR-LID) 1 Tr 10

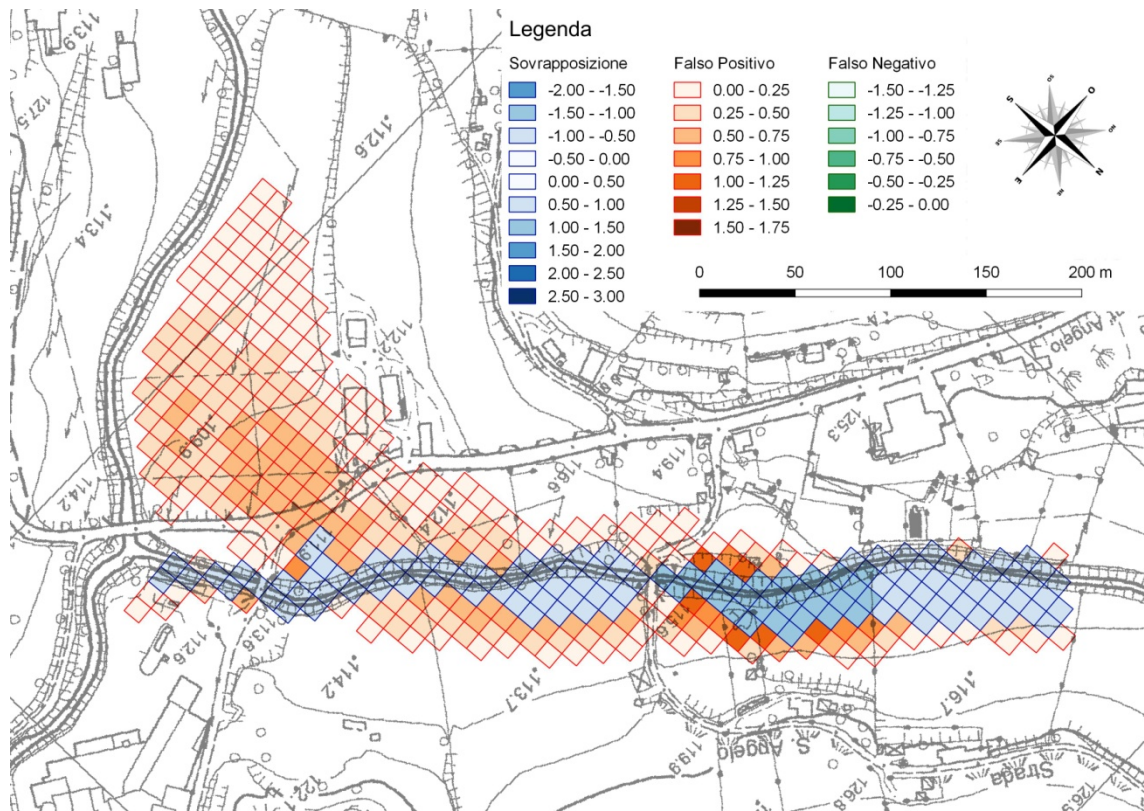


Figura 3.22 mappa della Serie (EBA-LID) - (FR-LID) Tr 50

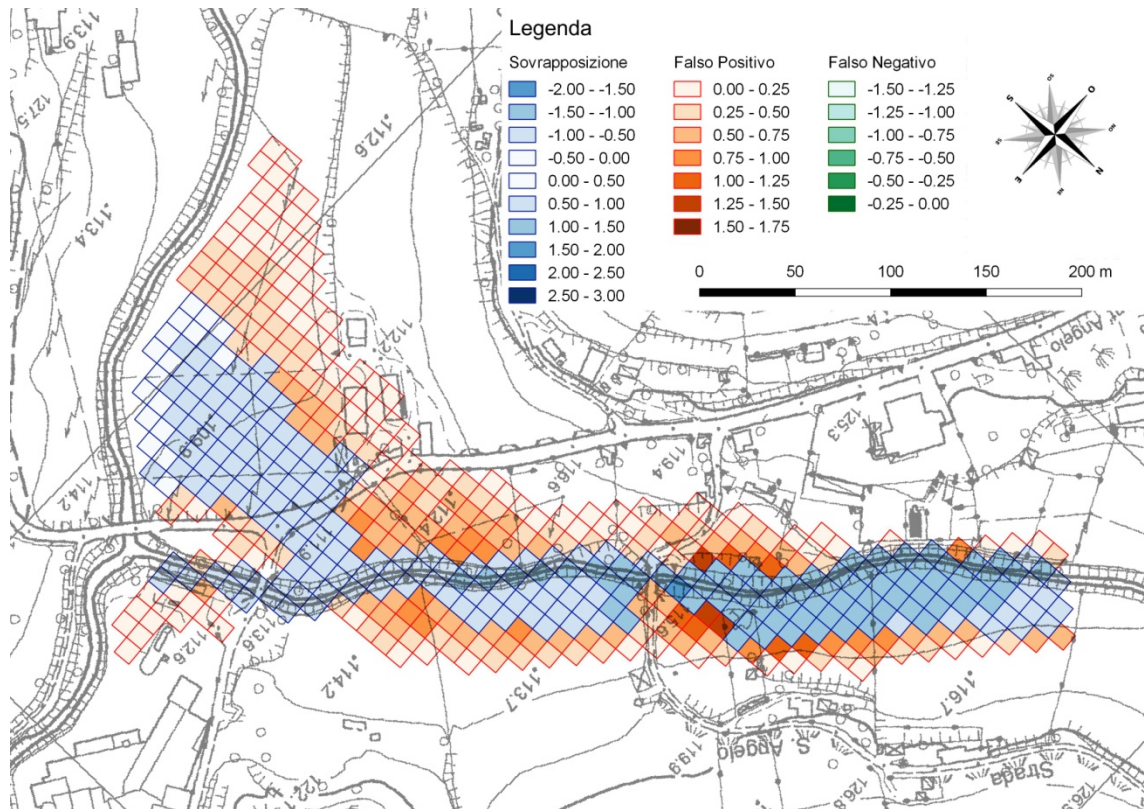


Figura 3.23 mappa della Serie (EBA-LID) - (FR-LID) Tr 100

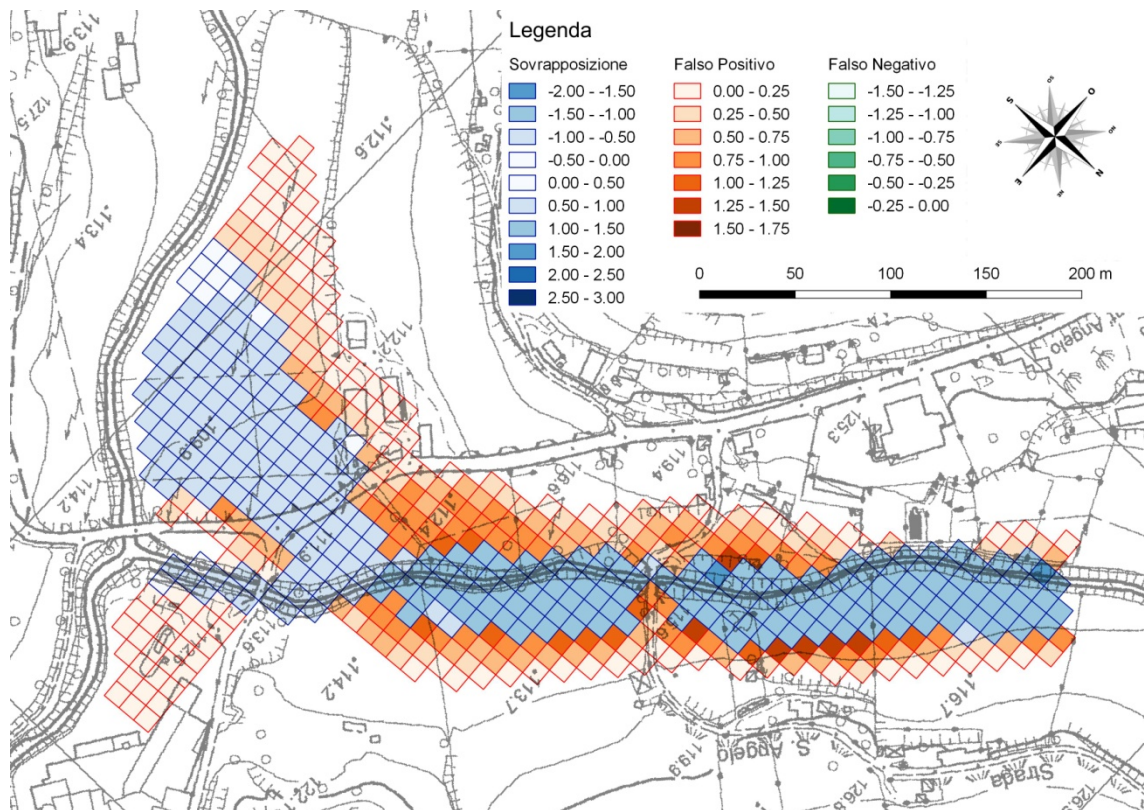


Figura 3.24 mappa della Serie (EBA-LID) - (FR-LID) Tr 200

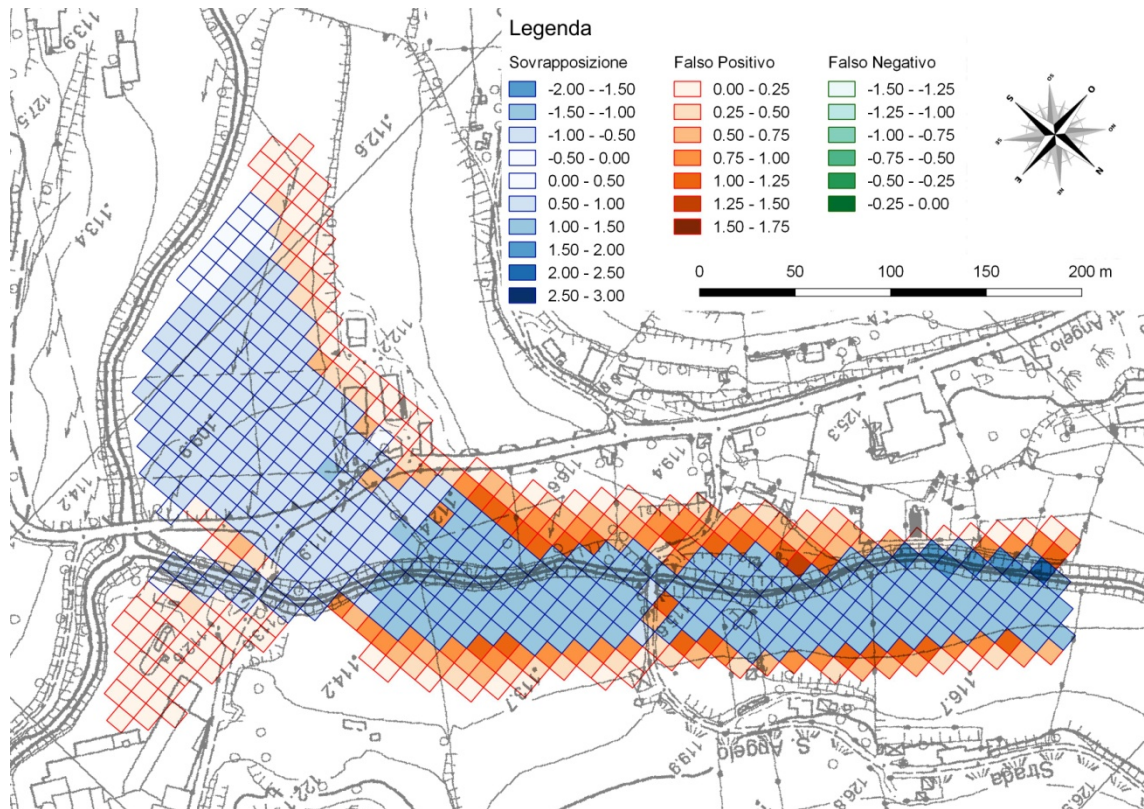


Figura 3.25 mappa della Serie (EBA-LID) - (FR-LID) Tr 500

Le mappe di differenza della serie (EBA-LID) - (FR-LID) evidenziamo come ci si poteva aspettare una considerevole presenza di falsi positivi per tutti i Tr ad eccezione del Tr 10 dove viceversa si riscontrano alcune celle falso negativo. Le superfici maggiori di falsi positivi sono evidentemente localizzate nell'area prossima alla confluenza con il Marta dove la floodplain si allarga e la morfologia più pianeggiante amplifica l'espansione dell'onda di piena. Viceversa a monte dove la zona di floodplain è maggiormente ristretta, le superficie allagate sono inferiori ma aumentano sensibilmente i tiranti idrici.

Considerando la presenza solo nel Tr 10 di alcune celle di falsi negativi, in tutte le altre mappe il livello idrico è sempre maggiore in tutte le celle con intervalli che superano anche i 150 cm.

Come era facilmente prevedibile la differenza è significativa ed è dovuta al diverso idrogramma adottato.

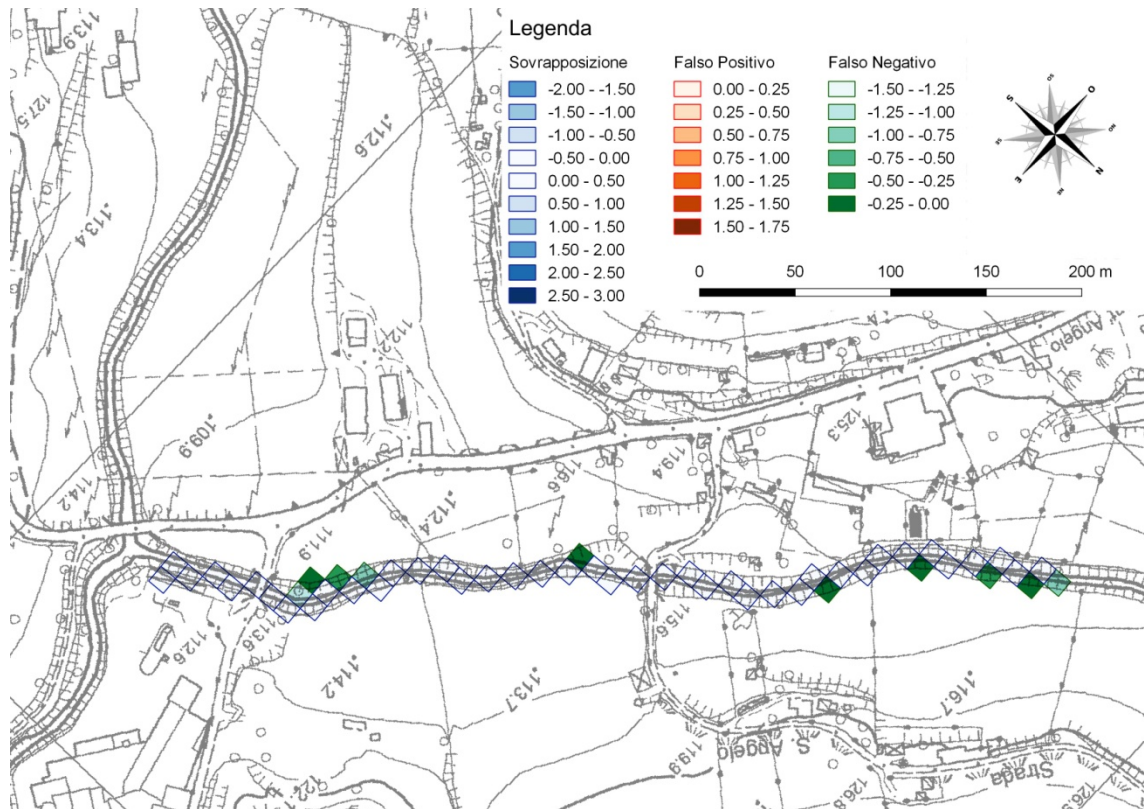


Figura 3.26 mappa della Serie (FR-UAV) - (FR-LID) Tr 10

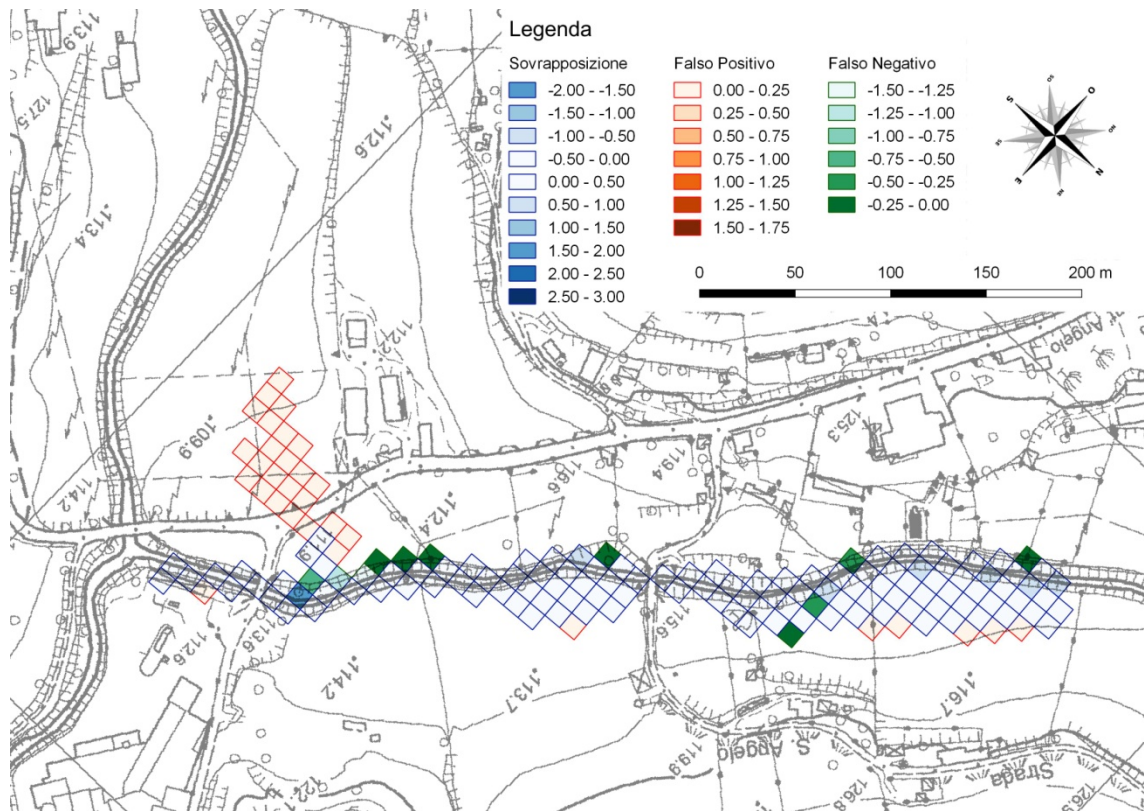


Figura 3.27 mappa della Serie (FR-UAV) - (FR-LID) Tr 50

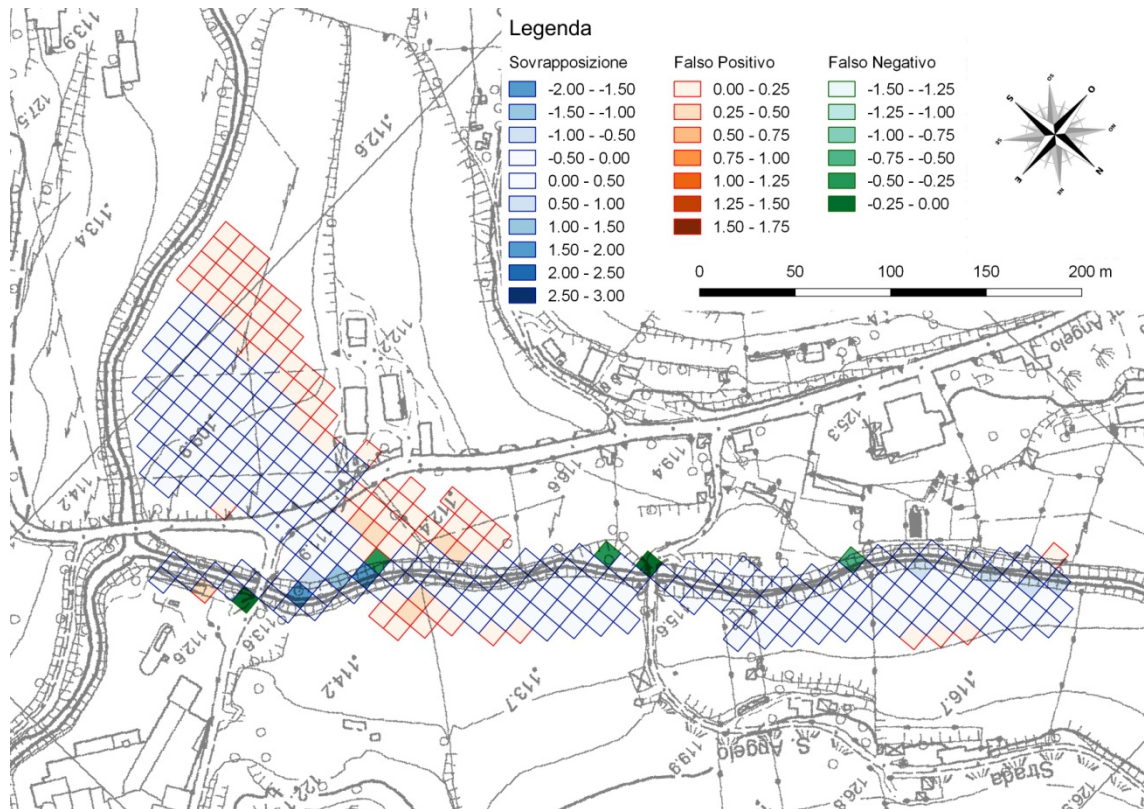


Figura 3.28 mappa della Serie (FR-UAV) - (FR-LID) Tr 100

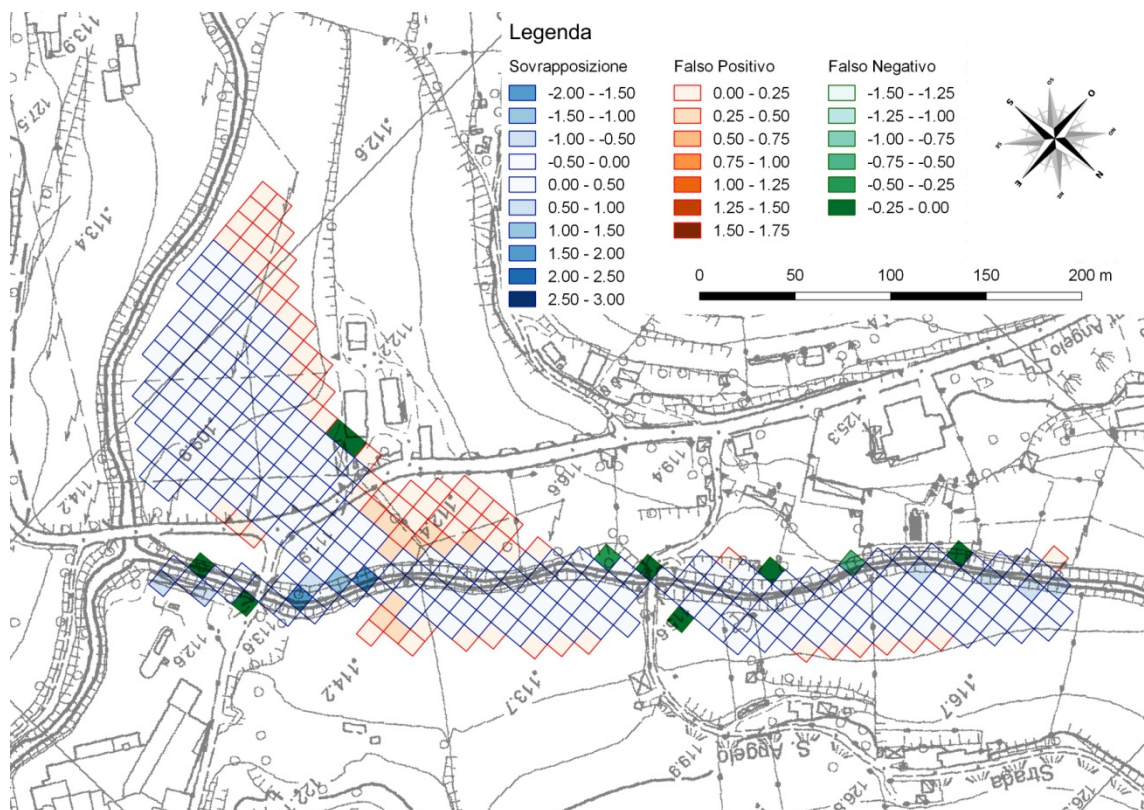


Figura 3.29 mappa della Serie (FR-UAV) - (FR-LID) Tr 200

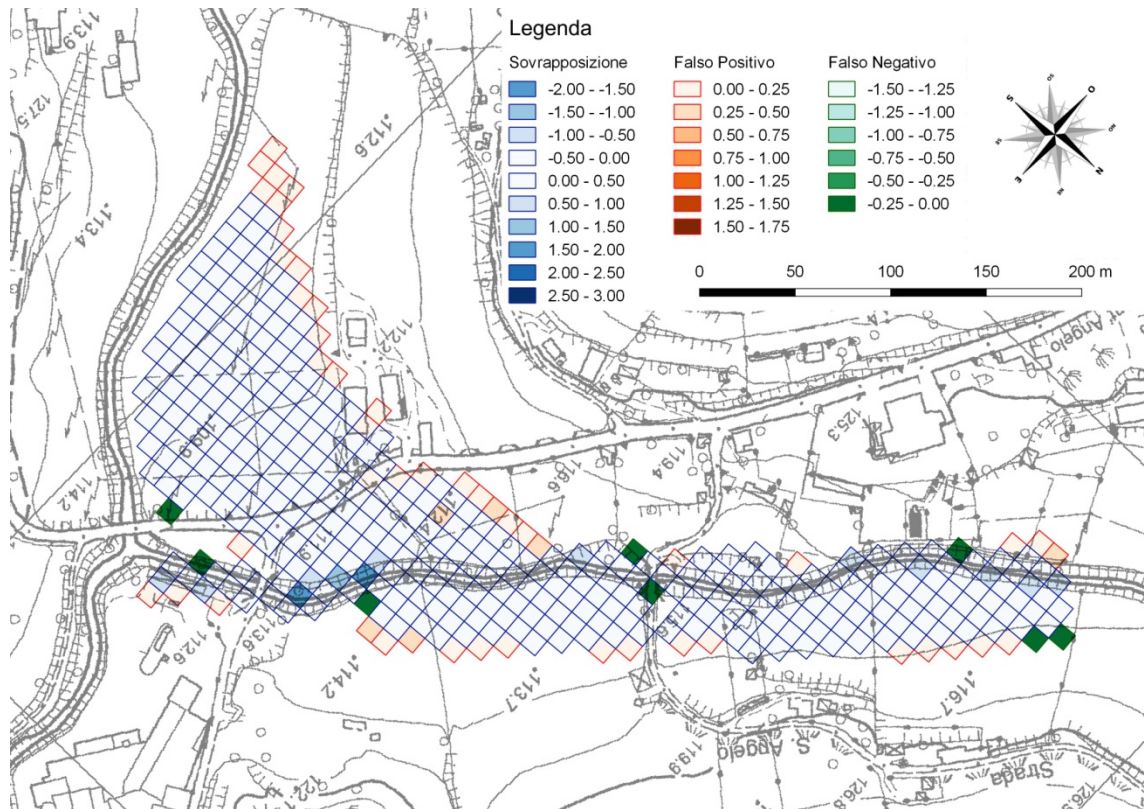


Figura 3.30 mappa della Serie (FR-UAV) - (FR-LiD) Tr 500

Nella serie (FR-UAV) - (FR-LiD) le mappe di differenza evidenziamo in primo luogo la presenza di falsi negativi in tutti i Tr. La maggior parte sono posizionati in celle prossime all'alveo in oggetto, più raramente invece interessano la floodplain.

Da notare la presenza costate nei Tr 100, 200 e 500 di falsi negativi in prossimità dell'attraversamento del fosso posto nella zona centrale del dominio di calcolo. Tale circostanza evidenzia di fatto una differenza dovuta all'adozione del DTM da UAV rispetto al LiDAR.

Sulla scorta della figura 3.2 si evince che tale comportamento idraulico è imputabile alla presenza di alcune celle aventi quota maggiore. La diversa stima altimetrica deriva dalla presenza di elementi antropici che a seguito del post-processing vengono restituiti in maniera differente. Infatti anche dal confronto dei DTM della figura 3.1 si evince che il DTM LiDAR non restituisce la topografia dei ponti che invece si ritrova nel DTM da UAV.

Similmente a quanto osservato nella serie (EBA-LiD) - (FR-LiD) anche in questa serie le maggiori differenze in termini di superfici si evidenziano dove la morfologia è più pianeggiante e la floodplain è più ampia. In termini assoluti tale differenza è comunque inferiore rispetto alla precedente come evidenziato nel grafico 3.15.

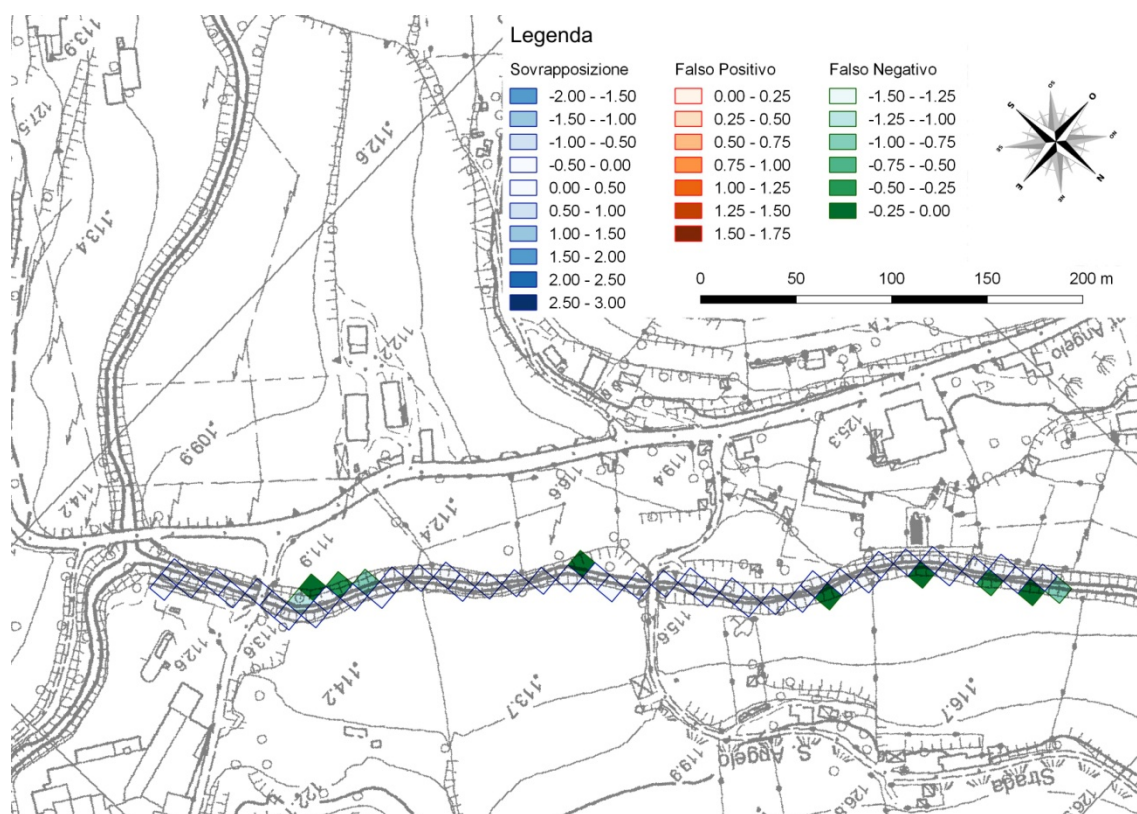


Figura 3.31 mappa della Serie (EBA-UAV) - (FR-LID) Tr 10

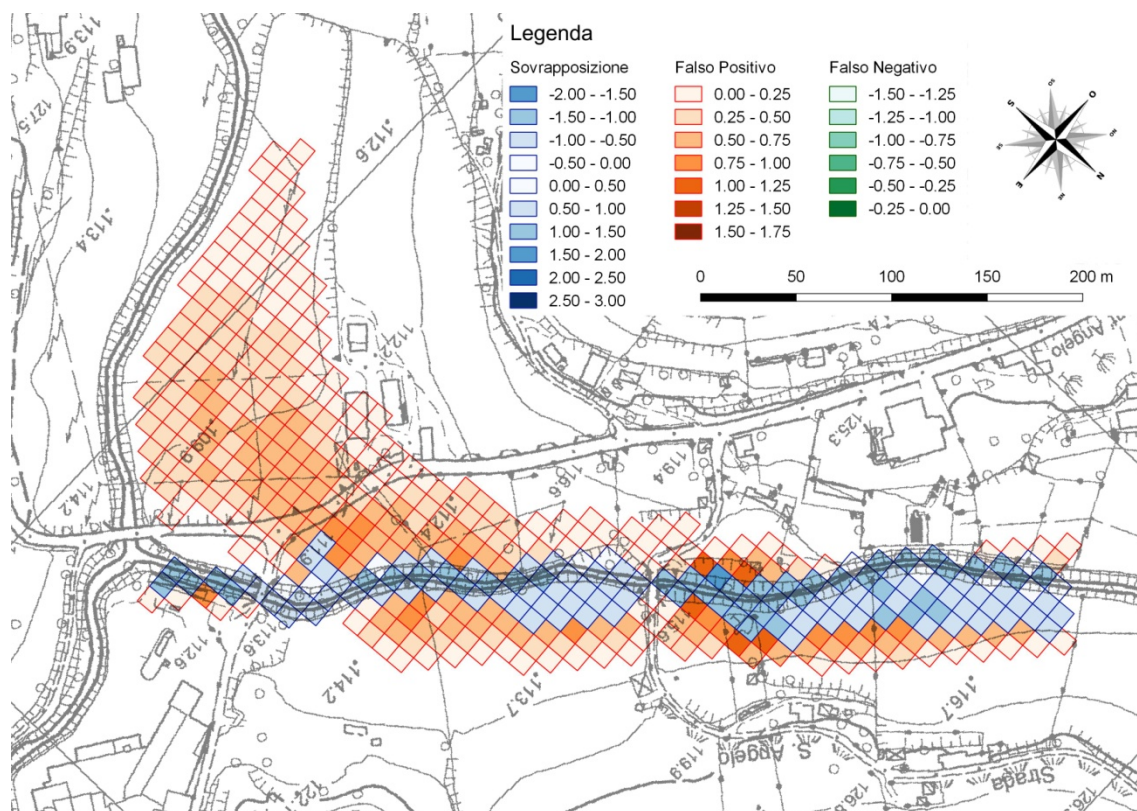


Figura 3.32 mappa della Serie (EBA-UAV) - (FR-LID) Tr 50

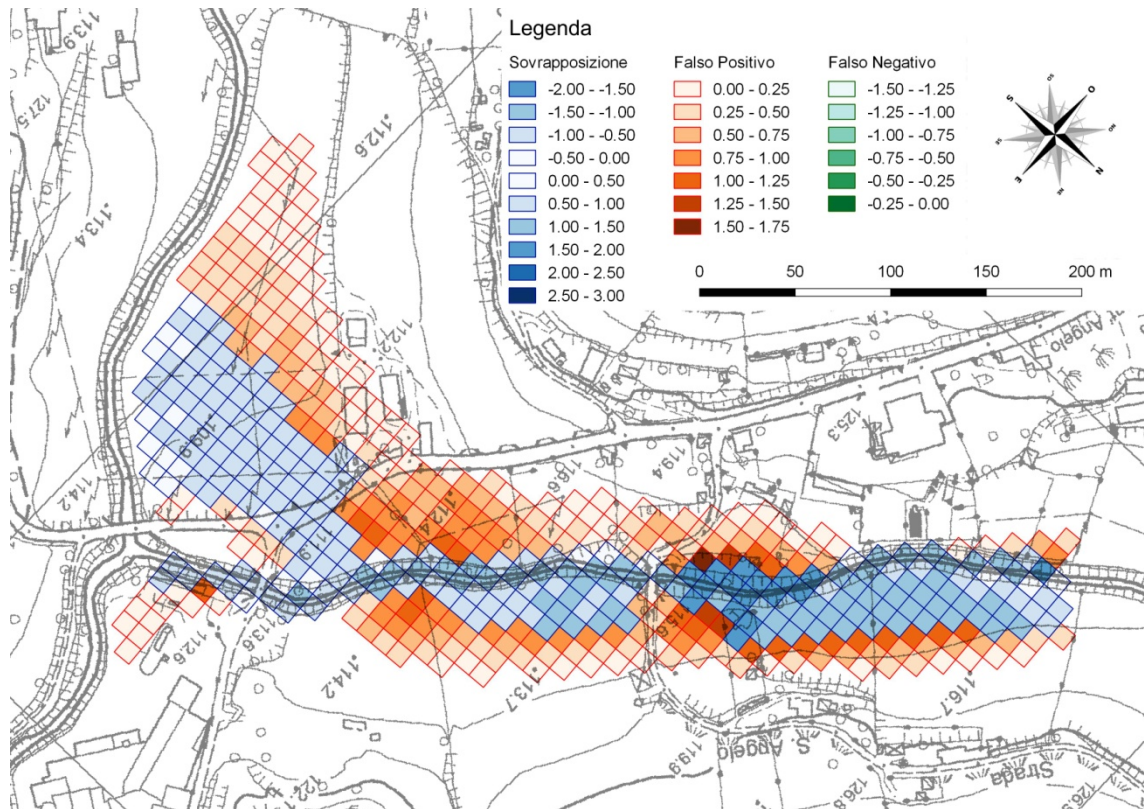


Figura 3.33 mappa della Serie (EBA-UAV) - (FR-LID) Tr 100

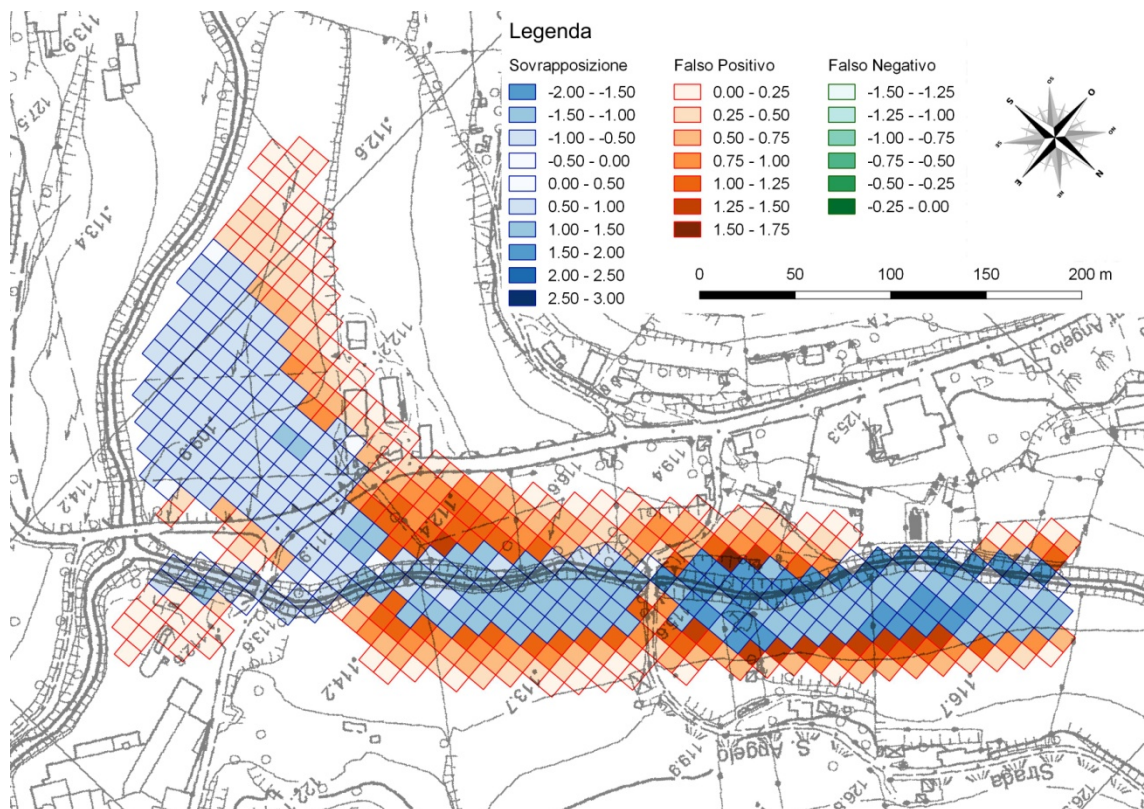


Figura 3.34 mappa della Serie (EBA-UAV) - (FR-LID) Tr 200

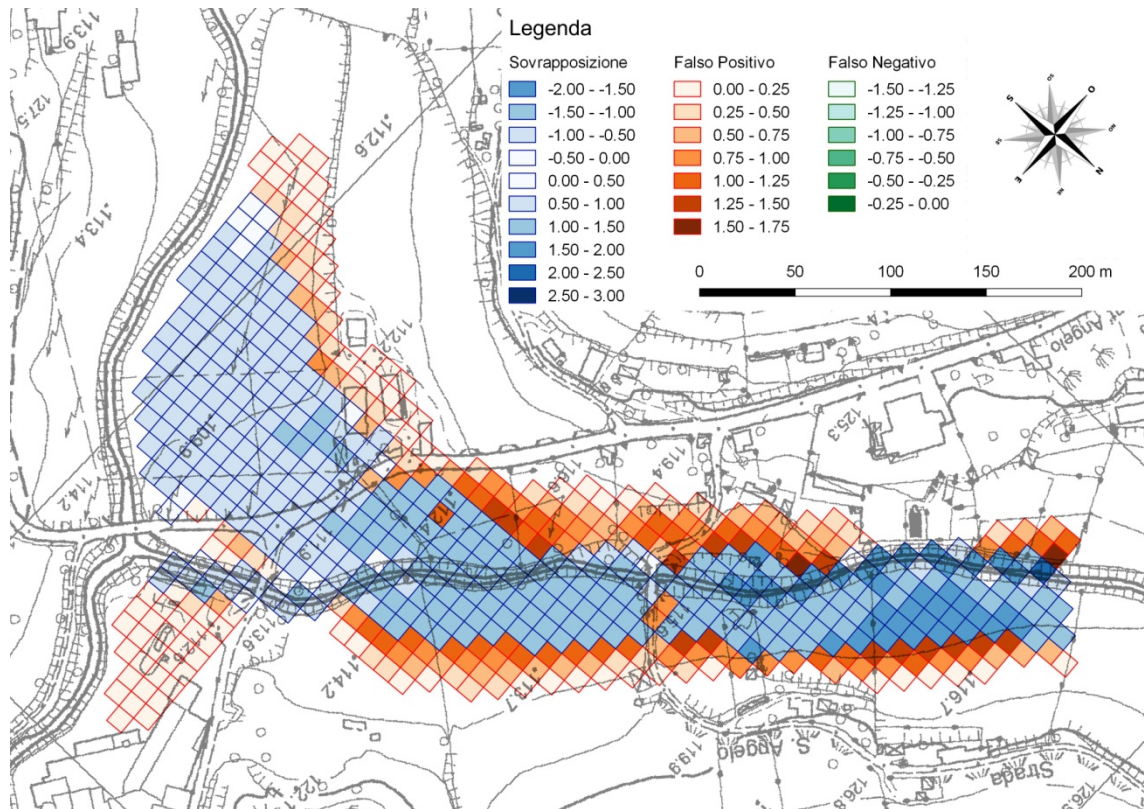


Figura 3.35 mappa della Serie (EBA-UAV) - (FR-LID) Tr 500

Nella mappe di differenza della serie (EBA-UAV) - (FR-LID) si possono riconoscere gli elementi significativi delle variabili in gioco, già evidenziati nelle serie precedenti che in questo caso si sommano.

Analogamente alla serie (EBA-LID) - (FR-LID), le mappe evidenziano un'ampia casistica di falsi positivi già al Tr 50 che aumentano con il crescere del Tr seppur in maniera non proporzionale. Allo stesso tempo anche i tiranti dei falsi positivi si innalzano soprattutto nelle zona dove la sezione della floodplain è minore.

Similmente invece alla serie (FR-UAV) - (FR-LID) si evidenzia la presenza di falsi negativi al Tr 10. Quest'ultimi scompaiono nei Tr successivi a favore di falsi positivi con tiranti ridotti rispetto alle celle limitrofe. Tale elemento di discontinuità è sostanzialmente dovuto alle differenze morfologiche indotte dal DTM UAV come già descritto per la serie (FR-UAV) - (FR-LID).

Tuttavia anche in questo caso l'idrogramma si conferma la variabile più determinate rispetto al modello morfologico, seppur quest'ultimo abbia evidenziato delle differenze in prossimità delle strutture antropiche.

4) CONCLUSIONI

La determinazione delle mappe di esondazione può seguire diversi approcci; un approccio convenzionale si basa spesso sull'utilizzo della Formula Razionale per l'analisi idrologica attraverso il quale si perviene in maniera sintetica all'idrogramma di piena. Quest'ultimo deve essere veicolato nel modello morfologico per la successiva simulazione con applicazione del modello idraulico bidimensionale. Solitamente il modello morfologico è costituito dal LiDAR, ove disponibile, diversamente si ricorre a rilevamento topografico oppure vengono adottati DTM derivanti dalla cartografia convenzionale.

L'approccio avanzato, esposto in questa sede, prevede l'adozione di un modello idrologico fisicamente basato che attraverso un'analisi a scala di bacino determina l'idrogramma di piena. Analogamente al precedente, l'idrogramma è utilizzato nella simulazione del modello idraulico e viene veicolato nel DTM in questo caso ottenuto da rilevamento fotogrammetrico tramite UAV.

Scopo della tesi è pertanto verificare se la ricostruzione topografica realizzata con l'utilizzo di strumentazione a basso costo sia sufficientemente accurata ed affidabile da essere alternativa al consolidato LiDAR, esclusivamente nell'ambito della modellazione idraulica finalizzata alla determinazione delle mappe di allagabilità.

L'analisi dei risultati è stata articolata in tre sezioni, la prima focalizzata sulle differenze dei DTM considerati, LiDAR e da UAV, la seconda sezione ha riguardato le differenze della parte idrologica, nella terza sezione infine è possibile apprezzare il contributo di entrambe le variabili nella determinazione delle mappe di allagabilità.

Le differenze del DTM di ingresso per l'applicazione del modello idraulico sono state apprezzate soprattutto nelle zone più articolate in presenza di elementi antropici dove il maggior dettaglio del DTM da UAV può non aver trovato corrispondenza nel LiDAR.

Ciò si verifica anche nelle zone di alveo dove la componente vegetale e lo specchio d'acqua ostacola significativamente la ricostruzione fotogrammetrica.

Diversamente nella floodplain la ricostruzione è maggiormente fedele e l'interpolazione dei DTM ai fini dell'utilizzo nel dominio di calcolo riduce ulteriormente le differenze che in conclusione possono essere ritenute non limitanti, come emerge dall'interpretazione dei risultati di simulazione.

Per quanto concerne la parte idrologica, la determinazione degli idrogrammi di progetto ha evidenziato una netta differenza tra l'approccio tradizionale della Formula Razionale e l'applicazione del modello idrologico EBA4SUB, sia in termini di portata di picco, sia per quanto riguarda la forma dell'idrogramma.

La Formula Razionale tende a sottostimare le portate di picco in maniera significativa per i Tr più alti, già al Tr 50. Questo produce inevitabilmente importanti differenze nelle fasi successive di simulazione idraulica. Inoltre anche la forma dell'idrogramma ha un'influenza nella determinazione delle aree e la differente conformazione dell'onda di piena del modello EBA4SUB imprime un'intensità ed una durata assai diversa e maggiore rispetto alla Formula Razionale.

I risultati della modellazione idraulica hanno evidenziato che la maggiore differenza di risultati è imputabile all'applicazione del diverso idrogramma, con un'importata sottostima dell'approccio tradizionale basato sulla Formula Razionale.

Diversamente solo in un caso l'applicazione del DTM derivato da UAV ha indotto una differenza nel risultato della simulazione, in dettaglio si ha una maggiore area di esondazione confrontando la serie FR-LID ed FR-UAV, a fronte di volumi esondati sovrapponibili a conferma che le maggiori aree allagate sono caratterizzate da uno scarso tirante.

Pertanto, ad eccezione del caso richiamato, le simulazioni individuano nella componente idrologica la variante maggiormente influente. Il maggior peso che assume detta variabile può rendere secondaria la variabile morfologica; in caso di adozione dell'idrogramma EBA4SUB le differenze della morfologia non alterano il risultato, viceversa, adottando l'idrologia della Formula Razionale, può essere apprezzata una differenza in termini di superfici ma non in termini di volume, a dimostrazione di una influenza comunque contenuta.

Da quanto sopra emerge che esistono margini di applicazione per l'utilizzo della tecnologia fotogrammetrica da UAV anche a basso costo, a patto che le finalità e gli ambiti di rilievo rispecchino quelle circoscritte nel presente lavoro; invero in caso di applicazione per finalità propriamente topografiche si possono richiedere precisioni superiori e conseguentemente configurazioni più avanzate.

L'utilizzo della tecnica fotogrammetrica tramite UAV può comportare diversi vantaggi. Il vantaggio economico è indubbio, i costi per unità di superficie del rilevamento LiDAR con strumenti aviotrasportati sono piuttosto onerosi, in particolare su estensioni ridotte. I costi possono variare da poche centinaia di euro per estensioni a

livello di comprensorio o regione, sino ad oltre il migliaio di euro per Km² nel caso di piccole estensioni, che comunque rappresentano una superficie spesso molto più ampia di ciò che presumibilmente rappresenta il dominio di calcolo di una simulazione idraulica. A ciò deve essere chiaramente aggiunto un ulteriore onere per un post processamento non automatico necessario per ottenere un prodotto di qualità.

Il mercato del rilevamento da UAV è ancora in fase di espansione, ma l'utilizzo di strumentazione estremamente più semplice ed economica implica costi di esercizio più contenuti anche avuto riguardo delle superfici di rilevamento che certamente sono molto contenute rispetto ad un LiDAR aviotrasportato. In proporzione il costo di rilevamento UAV può andare da 1/5 ad 1/10 dell'omologo LiDAR.

Il vantaggio economico implica anche la possibilità di ripetere con una certa cadenza il rilievo o magari l'aggiornamento dello stesso dopo un evento calamitoso che può aver modificato le condizioni di simulazioni. La dinamicità con cui l'ambiente fluviale cambia deve essere considerata, eventuali miglioramenti delle tecniche di simulazioni o semplicemente l'utilizzo di dati di monitoraggio un tempo non disponibili possono essere vani se applicati ad un modello morfologico poco accurato o comunque superato.

Relativamente all'applicazione in oggetto, il DTM da UAV si è dimostrato sensibile alle aree caratterizzate da manufatti in particolar modo agli attraversamenti, due nel caso in oggetto. L'elevata risoluzione del DTM da UAV e la successiva elaborazione per l'ottenimento del DTM dal DSM hanno evidenziato la presenza di una zona sopraelevata rispetto al LiDAR dove invece l'informazione relativa all'attraversamento veniva persa presumibilmente nel post-processing.

Tale attraversamento assume una certa importanza sia per i fini della simulazione che può essere influenzata, sia come evidenza della presenza di un punto critico che può essere censito ed interpretato anche attraverso un'ortofoto ad alta risoluzione che il medesimo rilevamento da UAV restituisce.

In sintesi possono essere riconosciuti dei miglioramenti imputabili alla maggior quantità di informazioni che il rilievo fotogrammetrico restituisce anche grazie alla maggior risoluzione che può arrivare a definizioni sub-decimetriche come nel caso in oggetto.

In futuro l'utilizzo del rilievo fotogrammetrico da UAV è auspicabile venga adottato in tutte quelle circostanze in cui può contribuire ad un miglioramento della definizione delle aree di allagabilità. Ciò è verosimile ad esempio in tutte le zone

critiche del reticolo secondario dove non è disponibile il rilevamento LiDAR e non si dispone di sufficienti dati di monitoraggio; in tali condizioni la modellistica può sopperire fornendo un valido supporto decisionale nella fase di pianificazione del territorio e gestione idrogeologica di bacino.

L'utilizzo di modelli morfologici avanzati deve essere supportato da una altrettanto avanzata modellistica idrologica; come è emerso infatti, l'utilizzo della Formula Razionale ormai superata può rendere vano l'ulteriore sforzo nell'acquisizione di modelli digitali del terreno accurati e con elevata risoluzione, sia che si tratti di DTM da UAV sia che si tratti di LiDAR.

Il rilevamento fotogrammetrico da UAV non è comunque privo di elementi critici che devono essere ben ponderati e valutati al fine di pervenire ad un risultato soddisfacente.

In primo luogo l'autonomia costituisce certamente uno punti più vulnerabili, in questo ambito la tecnologia sta avanzando velocemente e già i modelli in uscita a distanza di un biennio vantano autonomie maggiori, alcuni sino a 30 minuti, seppur spesso afferenti a categorie di fascia superiore. Al fine di garantire una dimensione del GSD a terra dell'ordine di qualche centimetro effettuando una sovrapposizione adeguata, l'autonomia può rappresentare un elemento limitante e pertanto può rivelarsi necessario effettuare più voli nell'ambito della medesima campagna di rilevamento.

Anche il payload contenuto può rappresentare un elemento limitante, l'utilizzo di fotocamere più performanti è alla base delle configurazioni avanzate per rilevamento fotogrammetrico, tuttavia in tali casi anche l'hardware di volo è commisurato in termini di complessità, ridondanza, affidabilità e costi. L'adozione di soluzioni intermedie comporta in egual misura un adattamento del mezzo, tuttavia in tal caso occorrono competenze specifiche per ottenere prestazioni e affidabilità sufficienti che di fatto riportano a soluzioni specifiche non includibili nella fascia low cost.

Ulteriore margine di miglioramento potrà derivare in futuro dall'ottimizzazione del post-processing delle immagini acquisite attraverso l'utilizzo di pacchetti software specifici sempre più performanti in termini di risorse di calcolo necessarie.

5) BIBLIOGRAFIA

Agisoft, 2012. Agisoft Photoscan User Manual, Professional Edition, Version 0.9.0.

Agisoft, 2012. Agisoft Photoscan User Manual, Professional Edition, Version 1.2

Ai, M.; Hu, Q.; Li, J.; Wang, M.; Yuan, H.; Wang, S. A robust photogrammetric processing method of low-altitude UAV images. *Remote Sens.* 2015, 7, 2302–2333.

Anai, T.; Sasaki, T.; Osaragi, K.; Yamada, M.; Otomo, F.; Otani, H. Automatic exterior orientation procedure for low-cost UAV photogrammetry using video image tracking technique and GPS information. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2012, doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-469-2012.

Anderson, K.; Gaston, K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front. Ecol. Environ.* 2013, 11, 138–146.

Bahr, T.; Jin, X.; Lasica, R.; Giessel, D. Image registration of high-resolution UAV data: The new hypare algorithm. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2013, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-17-2013.

Baltsavias, E.P., Favey, E., Bauder, A., Bösch, H., Pateraki, M., 2001. Digital surface modeling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. *The Photogrammetric Record* 17, 243–273.

Baltsavias, Emmanuel P. 1999. “A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2–3): 83–94. doi:10.1016/S0924-2716(99)00014-3.

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217–1227.

Barry, P., Coakley, R., 2013. Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. XL-1/W2*, 27–31.

Betts, H.D., DeRose, R.C., 1999. Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 1, 91–101

Bird, S., Hogan, D., Schwab, J., 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 952–970.

Boccardo, P.; Chiabrando, F.; Dutto, F.; Tonolo, F.G.; Lingua, A. UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors* 2015, 15, 15717–15737.

Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision, Berlin, Germany, pp. 466–470.

Brasington, J., Smart, R.M.A., 2003. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 231–247.

Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A., 2000. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 973–990.

Chandler, J.H., Fryer, J.G., Jack, A., 2005. Metric capabilities of low cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record* 20, 12–26

Chandler, J.H., Ashmore, P., Paola, C., Gooch, M., Varkaris, F., 2002. Monitoring riverchannel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry. *Annals of the Association of American Geographers* 92, 631–644

Chandler, J.H., 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 51–63.

Chiang, K.W.; Tsai, M.L.; Naser, E.S.; Habib, A.; Chu, C.H. New calibration method using low cost MEMS IMUs to verify the performance of UAV-borne MMS payloads. *Sensors* 2015, 15, 6560–6585.

Clarke, T.A., Fryer, J.G., 1998. The development of camera calibration methods and models. *The Photogrammetric Record* 16, 51–66.

Colomina, I., and P. Molina. 2014. “Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92: 79–97. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

Deseilligny, M.P., Clery, I. 2011. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. In: Proceedings of ISPRS International Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualisation of Complex Architectures, Trento, Italy, 2–4 March, 2011, Trento, Italy, pp. 269–276.

Fewtrell, Timothy J., Alastair Duncan, Christopher C. Sampson, Jeffrey C. Neal, and Paul D. Bates. 2011. “Benchmarking Urban Flood Models of Varying Complexity and Scale Using High Resolution Terrestrial LiDAR Data.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36 (7-8): 281–91. doi:[10.1016/j.pce.2010.12.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.011)

Förstner, W., 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 26, 150–166.

Fraser, C.S., Cronk, S., 2009. A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 328–333.

Fuller, I.C., Large, A.R.G., Milan, D., 2003. Quantifying channel development and sediment transfer following chute cutoff in a wandering gravel-bed river. *Geomorphology* 54,307–323.

Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 32 (8), 1362–1376.

Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104 (2015) 101–111

Grimaldi S., Petroselli A., Serinaldi F., “Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach”, *Hydrological Processes*, 26 (20), pp 3124-3134. 2012. DOI: 10.1002/hyp.8384

Grimaldi S., Petroselli A., “Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins”, *Hydrological Sciences Journal*, 60 (1), 67-77. 2014.

Grimaldi S., Petroselli A., Arcangeletti E., Nardi F., “Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modelling”, *Journal of Hydrology*, 2013, 487, pp. 39-47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.023

Grimaldi S., Petroselli A., Romano N., “Green-Ampt Curve Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins”, *Hydrological Processes*, 2013. doi:10.1002/hyp.9303. Volume 27, Issue 8, pages 1253–1264.

Grimaldi S., Petroselli A., Romano N., “Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins: parameter sensitivity analysis”, *Hydrological Processes*, 2013. doi: 10.1002/hyp.9749. Volume 27, Issue 8, pages 1265–1275.

Grimaldi S., Petroselli A., Nardi F., 2012. “A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall–runoff modelling in small ungauged basins”. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 57, Issue 1, pp. 73-83, DOI:10.1080/02626667.2011.636045

Gülch, E., 2011. Photogrammetric evaluation of multi-temporal fixed wing UAV imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* XXXVIII-1/C22, 265–270.

Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Trittler, M., 2011. Performance test on UAV-based data collection. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* XXXVIII-1/C22, 7–12.

Haneberg, W.C., 2008. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 457–469.

Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, Manchester*, pp. 147–151.

Heng, B.C.P., Chandler, J.H., Armstrong, A., 2010. Applying close-range digital photogrammetry and soil erosion studies. *The Photogrammetric Record* 25, 240–265.

Heritage, G., Hetherington, D., 2007. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 66–74.

Hodge, R., Brasington, J., Richards, K., 2009. In-situ characterisation of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 954–968.

Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E., Macklin, M.G., 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1574–1592.

Keim, R.F., Skaugset, A.E., Bateman, D.S., 1999. Digital terrain modelling of small stream channels with a total-station theodolite. *Advances in Water Resources* 23, 41–48.

Keutterling, A., Thomas, A., 2006. Monitoring glacier elevation and volume changes with digital photogrammetry and GIS at Gepatschferner glacier, Austria. *International Journal of Remote Sensing* 27, 4371–4380.

Krosley, L.K., Shaffner, P.T., Oerter, E., Ortiz, T., 2006. Digital ground-based photogrammetry for measuring discontinuity orientations in steep rock exposures. *Proceedings of the 41st U.S. Symposium of Rock Mechanics. Golden, Colorado*, pp. 1–13.

Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., Gervais, F., 2011. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. XXXVIII-1/C22*, 125–130.

Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record* 16, 793–821.

Lane, S.N., Chandler, J.H., Porfiri, K., 2001. Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. *Journal of Hydraulic Engineering* 127, 871–877.

Lane, S.N., 2000. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 16, 937–961.

Leberl, Franz, Arnold Irschara, Thomas Pock, Philipp Meixner, Michael Gruber, Susanne Scholl, and Alexander Wiechert. 2010. "Point Clouds: LIDAR versus 3D Vision." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 76: 1123–34.

Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1705–1725

Liu, P.; Chen, A.; Huang, Y.; Han, J.; Lai, J.; Kang, S.; Wu, T.; Wen, M.; Tsai, M. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Struct. Syst.* 2014, 13, 1065–1094.

Lohani, B., Mason, D.C., 2001. Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56, 100–120.

Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision* 60 (2), 91–110.

Marzolf, I., Poesen, J., 2009. The potential of 3-D gully monitoring with GIS using highresolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology* 111, 48–60.

Matthews, N.A., 2008. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. Technical Note, 428. Bureau of Land Management, Denver, Colorado.

Notebaert, B., Verstraeten, G., Govers, G., Poesen, J., 2009. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 217–231.

Ozdemir, H., C. C. Sampson, G. A. M. de Almeida, and P. D. Bates. 2013. "Evaluating Scale and Roughness Effects in Urban Flood Modeling Using Terrestrial LIDAR Data." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10 (5): 5903–42. doi:10.5194/hessd-10-5903-2013.

Petroselli A., Grimaldi S. "Design hydrograph estimation in small and fully ungauged basin: a preliminary assessment of EBA4SUB framework", in press on *Journal of Flood Risk Management*, 2015. doi: 10.1111/jfr3.12193

Piscopia R., Petroselli A., Grimaldi S., "A software package for the prediction of design flood hydrograph in small and ungauged basins", *Journal of Agricultural Engineering* 2015; XLVI:432, 74-84, doi:10.4081/jae.2015.43227

Pyle, C.J., Richards, K.S., Chandler, J.H., 1997. Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *The Photogrammetric Record* 15, 753–764.

Remondino, F., Fraser, C., 2006. The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing Commission V Symposium. *Image Engineering and Vision Metrology*, pp. 266–272.

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3-D modelling: a review. *The Photogrammetric Record* 21, 269–291.

Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., & Troisi, S. (2012). Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—a critical overview. In *Progress in Cultural Heritage Preservation* (pp. 40-54). Springer Berlin Heidelberg.

Rieke-Zapp, D.H., Nearing, M.A., 2005. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record* 20, 69–87.

Roncella, R., Re, C., & Forlani, G. (2011). Performance evaluation of a structure and motion strategy in architecture and cultural heritage. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5/W16).

Rosnell, T., Honkavaara, E., 2012. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors* 12 (1), 453–480.

Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A., Allison, R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology* 38, 363–375.

Santise M., Fornari M., Forlani G., Roncella R.. Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5, 2014

Shahbazi, M.; Théau, J.; Ménard, P. Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *Gisci. Remote Sens.* 2014, 51, 339–365.

Snively, N., Seitz, S.N., Szeliski, R., 2006. Photo Tourism: Exploring Image Collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, New York, pp. 1–12.

Snively, N., Seitz, S.N., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80, 189–210.

Spetsakis, M.E., Aloimonos, Y., 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision* 6, 245–255.

Stojic, M., Chandler, J.H., Ashmore, P., Luce, J., 1998. The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64, 387–395.

Strecha, Christoph, François Gervais, Pascal Fua, Jean-Christophe Zufferey, Antoine Beyeler, Dario Floreano, and Olivier Küng. 2011. “The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery.” In . <http://infoscience.epfl.ch/record/168806>.

Sturznegger, M., Stead, D., 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology* 106, 163–182.

Szeliski, R., Kang, S.B., 1994. Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 5, 10–28.

Triglia Alessandro, Iadanza Calda, 2015. Rapporto di sintesi sul dissesto idrogeologico in Italia 2014. ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Turner, D.; Lucieer, A; Wallace, L. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote* 2014, 52, 2738–2745.

Vallet, J., Panissod, F., Strecha, C., Tracol, M., 2011. Photogrammetric performance of an ultra light weight Swinglet “UAV”. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 63,253–258.

Wu, C.T.; Hsiao, C.Y.; Chen, C.S. An assessment of errors using unconventional photogrammetric measurement technology with UAV photographic images as an example. *J. Appl. Sci. Eng.* 2013, 16, 105–116.

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 209–226.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., 2012. Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012) 300–314

Siti consultati:

Ministero dell'ambiente e della Tutela del territorio e del Mare
<http://www.minambiente.it/bandi/bando-la-fornitura-di-dati-e-servizi-il-potenziamento-del-sistema-informativo-del-piano>

Portale Cartografico Nazionale – Catalogo WFS: Autorità di Bacino, Reticolo Idrografico, Quadro di unione tavole LiDAR

http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/wfs/Autorita_bacino.map

http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/wfs/Aste_fluviali.map

http://wms.pcn.minambiente.it/ogc?map=/ms_ogc/wfs/QU_Lidar.map

PhotoScan, 2014. Algorithms used in Photoscan (last accessed December,19th2015)

<http://www.agisoft.ru/forum/index.php?topic=89.0>