ISSN 2039-7941
Anno 2016_Numero 330

rapporti tecnici INGV

Integrazione di dati laser scanning e fotogrammetrici per il monitoraggio delle coste: i primi rilievi TLS terrestri per il progetto SCANCOAST

330

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Direttore Responsabile
Stefano GRESTA

Editorial Board
Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV - RM1)
Raffaele AZZARO (INGV-CT)
Mario CASTELLANO (INGV-NA)
Viviana CASTELLI (INGV-BO)
Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)
Mauro DI VITO (INGV-NA)
Antonio GUARNIERI (INGV-BO)
Marcello LIOTTA (INGV-PA)
Mario MATTIA (INGV-CT)
Milena MORETTI (INGV-CNT)
Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)
Umberto SCIACCA (INGV-RM2)
Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)
Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)
Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)
Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione
Francesca Di Stefano - Referente
Rossella Celi
Tel. +39 06 51860068
redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:
Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO
© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Sede legale: Via di Vigna Murata, 605 | Roma

ISSN 2039-7941
Anno 2016_Numero 330

rapporti tecnici INGV

INTEGRAZIONE DI DATI LASER SCANNING E FOTOGRAMMETRICI PER IL MONITORAGGIO DELLE COSTE: I PRIMI RILIEVI TLS TERRESTRI PER IL PROGETTO SCANCOAST

Arianna Pesci[1], Paolo Stefanelli[2], Marina Bisson[3], Filippo Muccini[2], Cosmo Carmisciano[2]

[1]**INGV** (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)
[2]**INGV** (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)
[3]**INGV** (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa)

330

Indice

Introduzione 7

1. Cenni di TLS e specifiche dello scanner ILRIS 3D 8

2. Inquadramento dell'area di studio 9

3. Misure TLS e analisi preliminari 11

    3.1 Considerazioni sulle misure TLS 18

4. TLS e SfM 20

    4.1 Test TLS/SfM da misure terrestri 20

    4.2 Validazione modelli SfM 23

5. Conclusioni e *work in progress* 25

Ringraziamenti 26

Bibliografia 26

Sitografia 28

Introduzione

Il lavoro descritto in questo rapporto tecnico è parte integrante del programma operativo del progetto SCANCOAST, pensato per il monitoraggio di aree costiere e sottomarine condotto mediante l'integrazione di tecniche di telerilevamento quali *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), fotogrammetria digitale e *multibeam* interferometrico.

SCANCOAST è un progetto finanziato dalla Regione Liguria nell'ambito del Piano Operativo Regionale (2007-2013) Asse 1 Bando Distretto Ligure delle Tecnologie Marine. L'attività si concentra nel territorio ligure, nel versante delle Cinque Terre, particolarmente soggetto ad instabilità di natura idrogeologica quali fenomeni franosi o alluvioni le cui tragiche conseguenze sono state più volte raccontate nelle cronache locali e nazionali (ad esempio l'alluvione di Vernazza e Monterosso del 25 ottobre 2011). Lo scopo principale del progetto è realizzare ed utilizzare un sistema di osservazione e monitoraggio di tipo *contactless* che permetta, in tempi rapidi e con operazioni veloci, di restituire un *data set* di Modelli Digitali del Terreno (DTM) utilizzabile per identificare e monitorare potenziali fenomeni franosi.

L'area indagata si caratterizza per un elevato numero di settori con problemi di stabilità e di difficile accessibilità per la presenza di ripidi versanti esposti al mare che rendono assai ostico un approccio di studio di tipo tradizionale effettuato con misure ed osservazioni dirette *in situ*.

Nell'ambito delle tecniche da remoto, la fotogrammetria digitale moderna integrata da un'analisi delle immagini basata su algoritmi di tipo *Structure from Motion* (SfM) risulta particolarmente adatta per ottenere una definizione geo-morfologica di dettaglio dei corpi di frana [Westoby et al., 2012]. Tale prodotto costituisce la base fondamentale per mappare, nella fascia costiera, aree emerse e sottomarine potenzialmente instabili che possono costituire un fattore di rischio per le attività umane. L'osservazione da mare fornisce il vantaggio di avere una visione d'insieme della costa, compresi eventuali corpi di frana presenti. L'integrazione con i dati sottomarini da *multibeam* interferometrico, permette di investigare anche i corpi detritici alla base della scarpata, elemento di principale importanza per valutazioni sulla stabilità generale del pendio [Brock and Purkis, 2009; Michoud et al., 2014].

La fotogrammetria SfM permette di ottenere modelli tridimensionali densi e precisi a partire da serie di immagini digitali acquisite in piena libertà, senza l'uso di complessi e costosi sistemi per il posizionamento delle camere digitali nello spazio. Nonostante venga utilizzata la base geometrica della fotogrammetria tradizionale (equazioni di collinearità e geometria epipolare), si registra una notevole implementazione garantita dalla potenza di calcolo oggi disponibile anche in comuni PC [Hartley and Zisserman, 2004; Snavely et al., 2008; James and Robson, 2012]. Tale vantaggio permette di utilizzare algoritmi che individuano in modo automatico o semi-automatico una grande quantità di punti omologhi, cioè *pixel* relativi agli stessi elementi nelle immagini digitali acquisite da posizioni differenti intorno alla superficie di interesse. Così si forniscono le informazioni necessarie per calcolare la posizione e l'orientamento delle camere nello spazio fisico e si calcolano i parametri delle equazioni fotogrammetriche necessari a trasformare i *pixel* delle immagini in punti nello spazio tridimensionale. Esiste però un punto critico del rilievo SfM, ovvero la necessità di fornire un fattore di scala alle nuvole di punti da esso estratte per poterle inserire in un sistema metrico e restituire un modello registrato in un sistema di riferimento reale. Esperienze precedenti [Pesci et al., 2015a] hanno mostrato come la scelta di estrarre la lunghezza di polilinee create congiungendo particolari ben visibili nelle nuvole di punti fotogrammetriche e TLS, si sia rivelata ottimale per calcolare il fattore di scala rispetto al più tradizionale metodo di utilizzare le coordinate di un set di punti, misurati con GPS o con altri metodi (per esempio stazione totale) per le successive trasformazioni di Helmert (rototraslazioni più fattore di scala). La creazione di polilinee è estremamente semplice e performante in ambito architettonico per la facilità di individuare spigoli e forme particolari sulle quali fare passare linee virtuali; nei rilievi ambientali (territoriali) ciò risulta senz'altro più complicato poiché le caratteristiche del terreno rendono più difficile l'individuazione di punti di riferimento. In questi casi l'utilizzo a terra di *target* fotogrammetrici (croci, cerchi, etc.) misurati al centro con tecnologia di tipo *Global Positioning System* (GPS) potrebbe essere la soluzione più vantaggiosa purché distribuiti in modo omogeneo sull'area del rilievo. A seconda dei casi di studio, si dovrà verificare con cura quale strategia sia più adatta per ottenere modelli di giuste e realistiche dimensioni dal SfM.

Nei rilievi fotogrammetrici ottenuti da piattaforma mobile, si pensi per esempio ad immagini acquisite da una imbarcazione o da un drone radiocomandato a distanza, è possibile in fase di analisi avvalersi di coordinate misurate con GPS (in modalità statica o cinematica) per ottenere la giusta scala su aree di notevoli dimensioni ed è interessante comprendere, da un punto di vista qualitativo e quantitativo, l'eventuale errore

di scala indotto con queste procedure. Se invece le misure sono già metriche, come nel caso dell'acquisizione TLS, un rilievo speditivo può essere registrato in un sistema esterno con semplice roto-traslazione.

Il rilievo TLS è presentato nel dettaglio in questo lavoro per i seguenti scopi: a) ottenere un modello iniziale ad alta risoluzione di aree potenzialmente instabili e dunque di particolare interesse in quanto insistenti su zone abitate; b) studiare il contenuto di intensità del segnale per valutare la presenza di zone di accumulo di acqua e quindi osservare le parti maggiormente esposte a fenomeni di erosione del mare; c) ottenere un forte vincolo geometrico per la verifica dei rilievi SCANCOAST da piattaforma mobile; d) ricostruire la morfologia cercando di capire i limiti e vantaggi di un rilievo TLS, nell'ottica di una possibile integrazione con altre tecniche di rilievo quale per esempio ALS (*Airborne Laser Scanning*).

1. Cenni di TLS e specifiche dello scanner ILRIS3D

I sistemi TLS si basano essenzialmente sulla possibilità di inviare impulsi *laser* o *laser* modulati (nel caso degli strumenti ad onda continua) e misurarne il tempo di volo (oppure la differenza di fase) in modo da ottenere la distanza tra l'oggetto osservato e lo strumento; grazie a tale misurazione, coprendo una intera superficie fisica di interesse secondo una griglia angolare calibrata, si ottengono modelli tridimensionali ad alta precisione e risoluzione, perciò fedeli alla realtà [Sgrenzaroli e Vassena, 2007]. Benché oggi le informazioni tecniche fornite dalle case costruttrici siano generalmente chiare ed esaurienti, è sempre necessario realizzare esperimenti specifici al fine di comprendere a fondo le prestazioni degli strumenti utilizzati in modo da ottimizzare il rilievo per una massima resa in termini di risoluzione, stabilità e ripetibilità dei risultati [Pesci et al., 2011a; 2015abc]. Ciò è rilevante soprattutto in condizioni di emergenza dove i tempi e la logistica di intervento giocano un ruolo importante. Viceversa, laddove vincoli di sicurezza impongono l'esecuzione del rilievo da posizioni non favorevoli, la conoscenza delle corrispondenti distorsioni introdotte nella modellazione geometrica diviene prioritaria al fine di prevenire ingenui errori di valutazione ed interpretazione dei risultati. Gli strumenti TLS sono generalmente portabili, veloci, caratterizzati da elevato livello di automazione e consentono di riprodurre la realtà in tempi rapidi e con costi ragionevoli (ad esempio, è spesso possibile noleggiare la strumentazione più idonea per il genere di misura programmata). Nel caso specifico del progetto SCANCOAST, si è utilizzato lo *scanner* Optech ILRIS 3D (ER) [Optech, 2015], uno strumento a tempo di volo (*Time of Flight,* TOF) con caratteristiche note in termini di dimensioni del diametro dell'impronta del fascio (altrimenti detto divergenza o *spot*) e passo di campionamento (*spot spacing*) con la distanza di lavoro (figura 1).

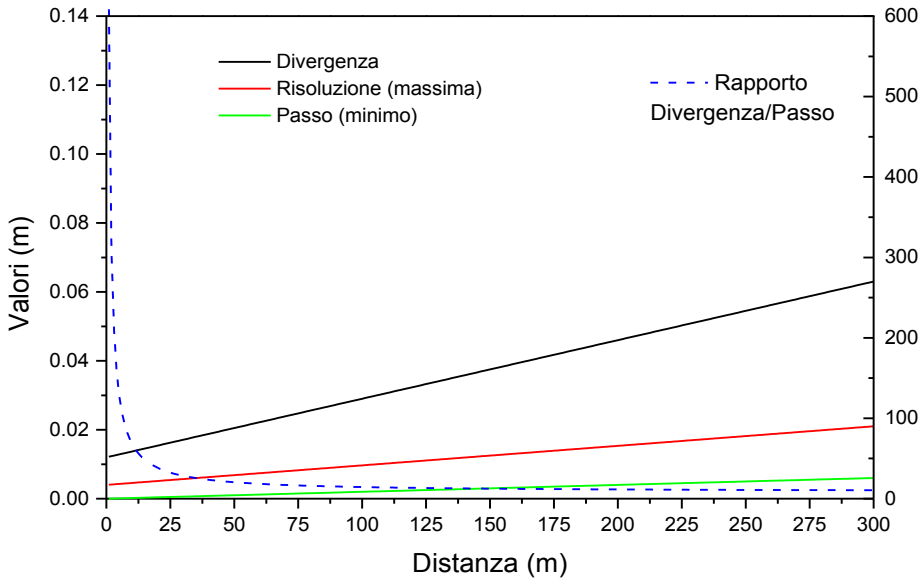


Figura 1. Grafico sintetico che mostra la relazione tra la distanza e le caratteristiche TLS. I valori in ordinata sono: divergenza, passo di campionamento e risoluzione. La massima risoluzione possibile, nelle migliori condizioni del rilievo, si stima in circa 1/3 del diametro dello *spot* sulla superficie (divergenza).

Dai risultati di esperimenti realizzati *ad hoc* [Pesci et al., 2013] è stato possibile fornire una valutazione circa la migliore risoluzione possibile, in condizioni ottimali di misura, in base alla distanza dalla superficie di interesse. In figura 1 si mostrano le informazioni tecniche relative alla caratteristica delle misure in termini di divergenza e passo di campionamento a cui è stato aggiunto il dato sulla risoluzione che è stata stimata in circa 1/3 della divergenza alla distanza di lavoro considerata. Va sottolineato che la risoluzione è intesa come la dimensione del più piccolo elemento che è possibile distinguere all'interno della scansione e che tale valore non è migliorabile con operazioni di sovra campionamento in quanto il numero di punti acquisiti, oltre una certa soglia, non è più in grado di aggiungere dettaglio e diventa solo rumore aggiunto.

Per completezza di informazione va precisato che gli strumenti TLS ad onda continua sono caratterizzati da migliori prestazioni in termini di precisione e velocità di acquisizione rispetto agli strumenti a tempo di volo (indicativamente ~5 mm a 50 m e 200-1000 kHz), da cui un loro sistematico uso nel rilievo architettonico. Recenti sperimentazioni hanno mostrato, tuttavia, che per lo studio e la comprensione delle piccole deformazioni il fattore più importante per un TLS è la stabilità di acquisizione cioè la ripetibilità delle misure che permette di superare i limiti di precisione e garantire un risultato realistico [Pesci et al., 2011a]. In generale, uno strumento TLS fornisce una nuvola di punti in cui al dato geometrico è associata l'intensità del segnale retroriflesso che dipende, oltre che dalla geometria dell'acquisizione, dalla riflettanza (s'intende alla lunghezza d'onda del segnale *laser*) del materiale dell'oggetto osservato [Franceschi et al., 2009].

2. Inquadramento dell'area di studio

L'area di indagine è la zona costiera del Comune di Monterosso, uno dei paesi che costituiscono le Cinque Terre del Levante ligure (figura 2). Tale territorio, a causa della sue particolari caratteristiche morfologiche e geologiche, è particolarmente esposto al dissesto idrogeologico. Le aree interessate da tale fenomeno insistono sia sui rilievi dell'entroterra che lungo tutta la fascia costiera, così come si evince dalla cartografia dell'Autorità di Bacino competente [Autorità di Bacino Regionale, 2013]. La morfologia predominante del paesaggio costiero è tipicamente di costa alta con versanti che spesso presentano elevata acclività, un fattore altamente predisponente nella dinamica delle frane. Dal punto di vista geologico, il territorio del Comune di Monterosso insiste su diverse unità tettoniche. Dalla Carta Geologica d'Italia [ISPRA, 2011] risulta che la parte orientale (figura 3) è costituita prevalentemente da rocce appartenenti alla Falda Toscana (Arenarie Zonate), mentre nella parte occidentale si trovano formazioni riconducibili alle Unità Liguri (serie delle Ofioliti del Supergruppo del Vara). Queste ultime sono legate ad episodi di magmatismo intrusivo avvenuti tra il Giurassico ed il Cretaceo Inferiore [Bortolotti et al., 2001]. La particolare disposizione degli strati rocciosi affioranti è legata alle fasi tettoniche di formazione dell'Appennino Settentrionale. In particolare, le rocce della serie sedimentaria affioranti nella parte occidentale del paese di Monterosso fanno parte di una struttura antiforme coricata a vergenza tirrenica denominata *Piega della Spezia* con asse Appenninico N 150° [Giammarino and Giglia, 1990; Cevasco, 2007] che rappresenta l'ossatura del Promontorio Occidentale del territorio spezzino. In queste fasi tettoniche, le rocce sono state sottoposte a forti deformazioni che ne hanno alterato l'originaria resistenza. L'azione dilavante delle acque, l'antropizzazione e l'azione del mare hanno contribuito negli anni ad indebolire tali versanti ed a far si che si formassero innumerevoli aree franose, alcune delle quali a ridosso dei centri abitati [Cevasco, 2007]. Le tipologie di frane presenti in queste zone ricadono principalmente nella categoria crolli e frane complesse, quest'ultime originate da una combinazione di diversi tipi di movimento quali crollo, scivolamento e rotazione [Varnes, 1978].

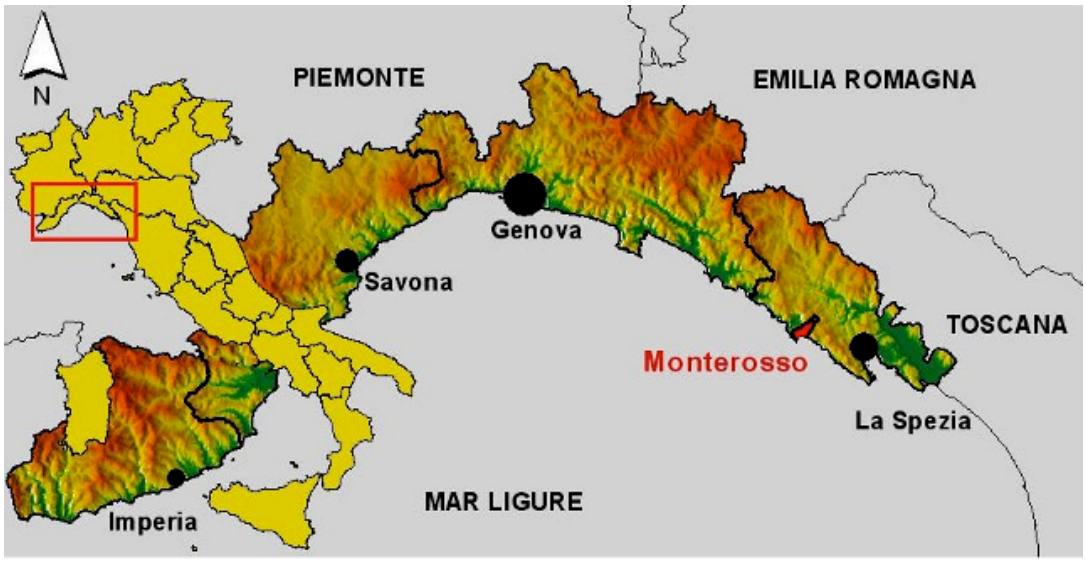


Figura 2. Inquadramento geografico dell'area di studio. Sullo sfondo il modello altimetrico del terreno a passo 240 m [Bisson et al., 2007].

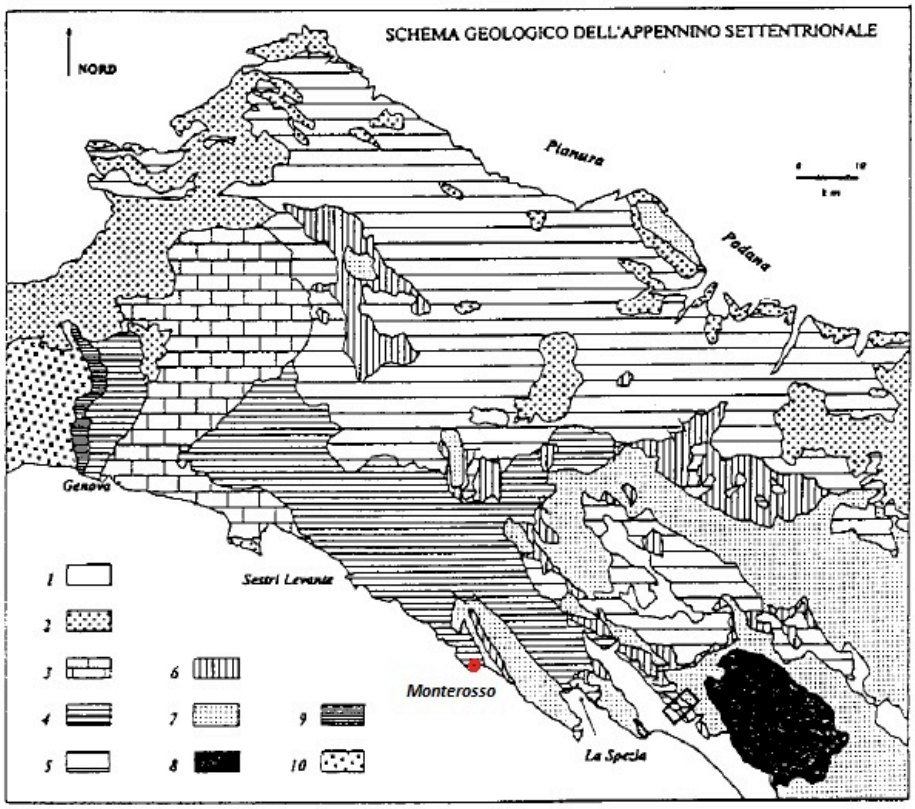


Figura 3. Inquadramento geologico dell'area di studio [Cerrina et al., 1995]: 1) Depositi PlioQuaternari; 2) Successione Epilugure e del Bacino Terziario Piemontese; 3) Unità dell'Antola; 4-5) Unità Liguri; 6) Unità Sub liguri; 7) Falda Toscana; 8) Complesso Metamorfico Apuano; 9) Unità tettoniche della zona Sestri Voltaggio; 10) Unità tettoniche del Gruppo di Voltri.

3. Misure TLS e analisi preliminari

Le misure realizzate con tecnologia TLS hanno riguardato una porzione molto ampia dell'area totale di studio nel progetto SCANCOAST. La figura 4 mostra una serie di immagini aeree dove sono indicate le aree indagate (riquadri rossi) e le posizioni (cerchi rossi) dalle quali sono state effettuate le scansioni del litorale. Complessivamente, l'area di costa della baia è stata rilevata per un buon 50%.

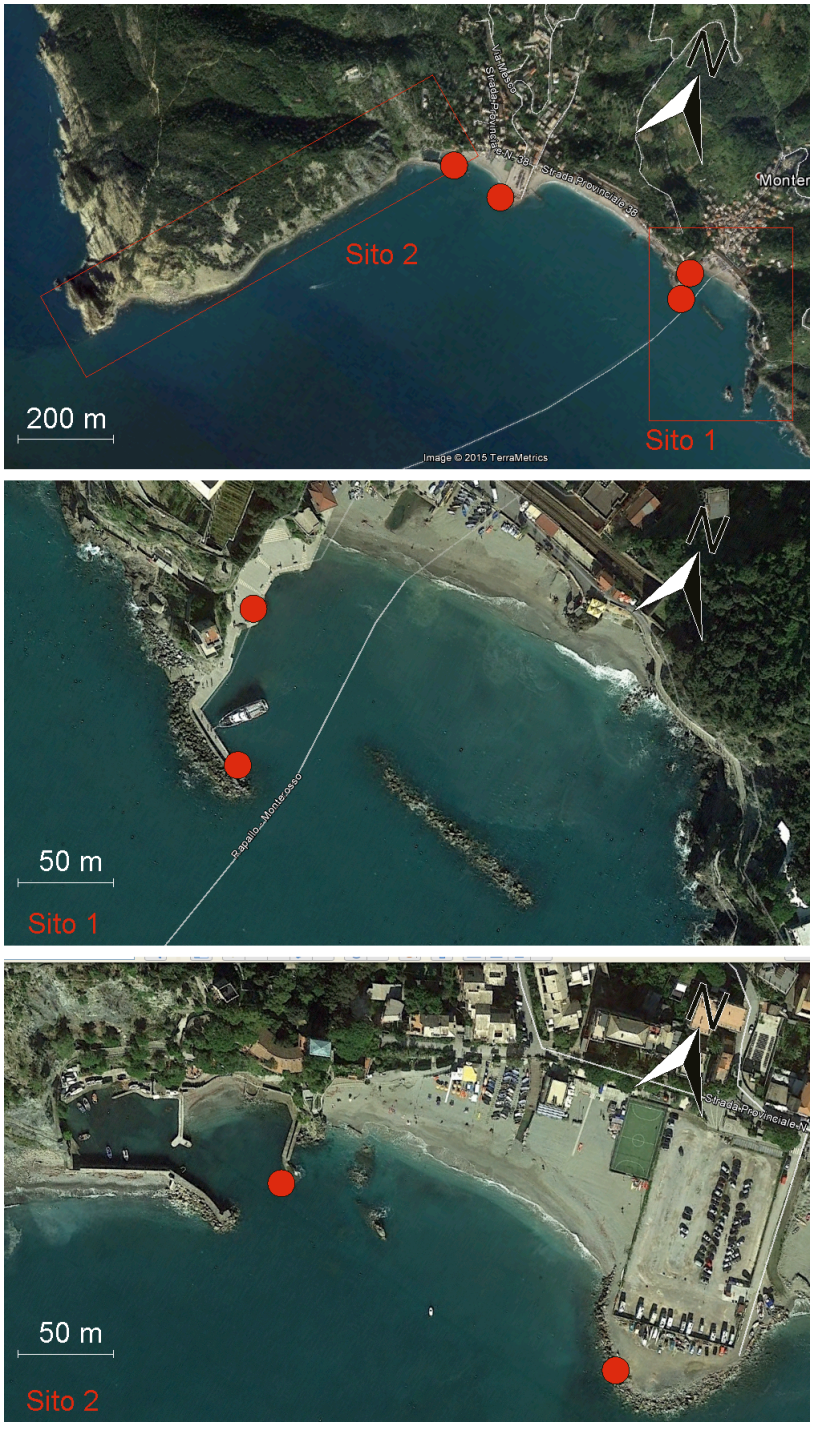


Figura 4. Area di studio. I riquadri rossi indicano le zone di costa rilevate ed i cerchi rossi mostrano, da vista aerea, i punti su cui lo strumento è stato messo in stazione.

Nell'intento di rilevare le aree dei siti 1 e 2, la scelta dei punti di stazione è stata quasi obbligata dalla tipologia dello strumento utilizzato. In effetti il *laser scanner* utilizzato non può lavorare in movimento bensì richiede di essere montato su treppiede o altro supporto stabile. In realtà alcuni modelli più recenti permettono il collegamento con GPS e piattaforma inerziale ed operano nella modalità di profilometri per rilievi cinematici una volta montati su imbarcazione o qualsivoglia sistema mobile [Kennedy et al*.,* 2014].

Per garantire un posizionamento frontale alle pareti rocciose e permettere operazioni di tilt sicure al fine di ottimizzare il campo di scansione (*Region of Interest*, ROI), lo *scanner* è stato posizionato su un treppiede dotato di una base in alluminio, appositamente realizzata per gestire in modo semplice l'assetto e le necessarie rotazioni. La base in questione risulta leggera e maneggevole e permette di ancorare saldamente lo strumento al treppiede senza vincolarlo, ovvero consentendone un posizionamento di precisione mediante semplici movimenti della base stessa che inducono controllati spostamenti del centro di massa del sistema, cosa che ne migliora la stabilità (figura 5).



Figura 5. Lo strumento ILRIS 3D montato sulla base di alluminio progettata per un saldo ancoraggio e la possibilità di operare rotazione e tilt con movimenti semplici e controllati.

Lo *scanner* è dotato di due livelle posizionate sugli assi principali che garantiscono l'ortogonalità delle scansioni; tale ortogonalità si rende necessaria per fornire la corretta verticalità alla nuvola di punti finale. Va comunque sottolineato che la verticale fornita in questa modalità di lavoro non ha le precisioni necessarie per valutazioni robuste sull'inclinazione dei versanti ma può essere utilizzata al fine di garantire un orientamento preliminare, vicino alla realtà, per analisi e valutazioni iniziali. Per ottenere una verticalità più corretta si può agire in diverse maniere: (a) direttamente sul campo tramite l'utilizzo di bolle e livelle elettroniche; (b) in post-*processing*, individuando *target* architettonici (edifici, abitazioni, ecc.) e calcolando una media di tutte le verticalità estratte; (c) scegliendo punti visibili e misurati nelle scansioni e riconducibili a rilievi topografici per l'inserimento del modello laser in un sistema di riferimento esterno. Per gli scopi del rilievo, che ricordiamo essere stato realizzato quale supporto alla verifica e validazione di misure esterne ed indipendenti, non risulta fondamentale una verticale perfetta e pertanto, non si è ritenuto utile soffermarsi ulteriormente sul problema.

Il sito 1 è stato rilevato per intero mediante la realizzazione di 10 scansioni. Alcune di queste sono state realizzate nel maggio 2015 in occasione di una prima campagna di misure effettuata a scopo di test. Tali scansioni sono servite a valutare le prestazioni ottenibili con un rilievo TLS dalle posizioni preliminarmente individuate e a predisporre le operazioni logistiche utili per l' esecuzione delle campagne successive. La figura 6 mostra nel dettaglio tutte le scansioni acquisite e l'immagine catturata dalla fotocamera installata sullo strumento.

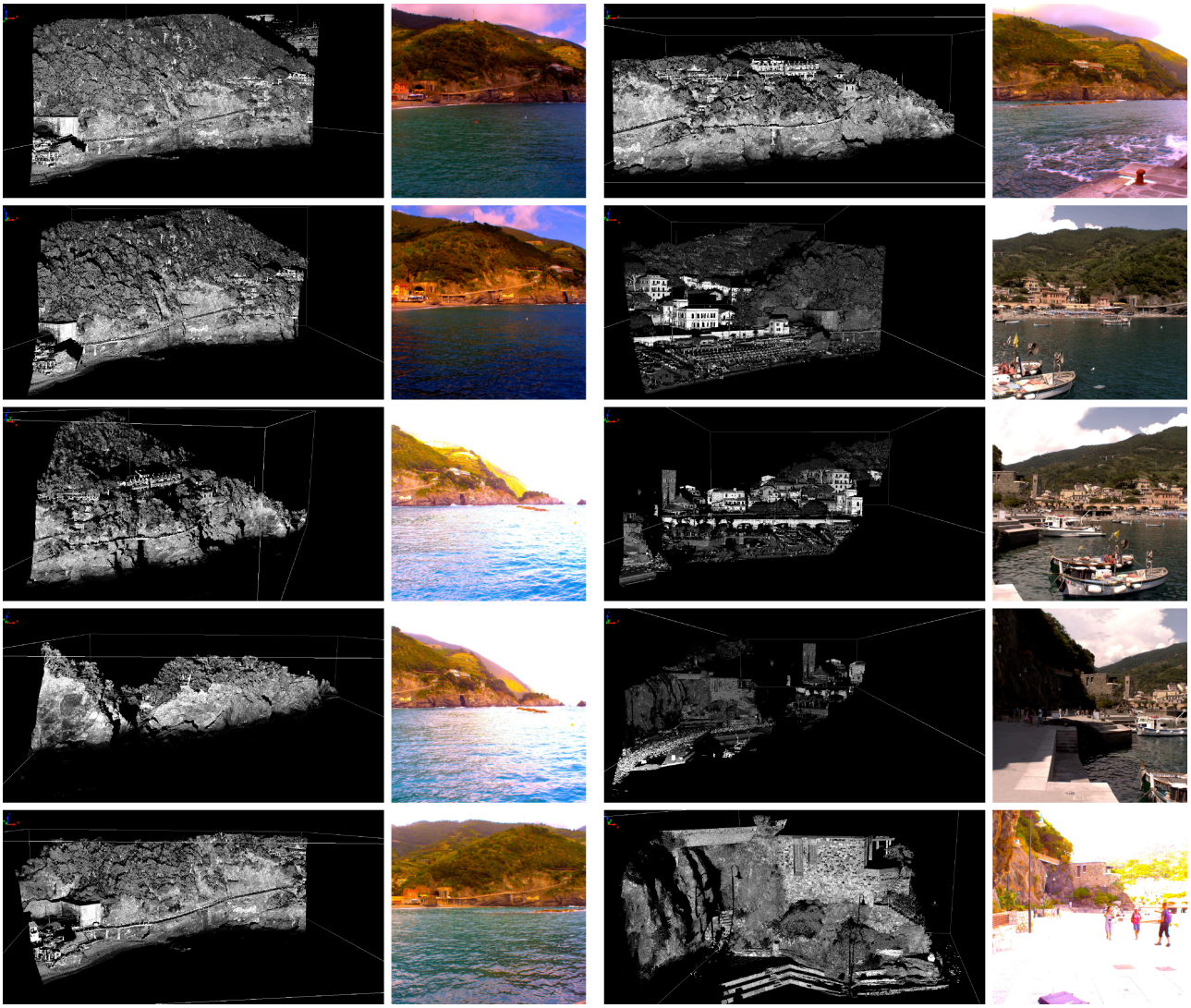


Figura 6. Le scansioni del rilievo sito 1. Le immagini si riferiscono all'interfaccia dello scanner dove si seleziona l'area da misurare.

Le operazioni necessarie per unire in maniera robusta e accurata tutte le nuvole di punti sono basate su algoritmi di tipo *Iterative Closest Points* (ICP) che consentono di determinare i migliori parametri di roto-traslazione che permetteranno di inserire le scansioni nello stesso sistema di riferimento (relativo). L'allineamento delle scansioni, quindi, è stato realizzato all'interno del modulo IMAlign del *software* Polyworks [Innovmetric, 2015] per la progressiva ricostruzione di tutta l'area (figura 7) procedendo secondo i seguenti step: a) creazione di modelli preliminari di tipo DTM delle singole scansioni; b) riconoscimento di punti omologhi nelle aree comuni alle scansioni (aree di *overlapping*); c) minimizzazione della distanza tra le coordinate dei punti omologhi mediante calcolo ai minimi quadrati di parametri di roto-traslazione con un conseguente pre-allineamento, o allineamento grezzo; d) applicazione di algoritmi ICP per un allineamento di finitura.

Il *software* utilizzato lavora su modelli a griglia ottenuti dalle scansioni minimizzando non solo la distanza tra i punti ma anche le curvature delle superfici modellate; tale operazione risulta estremamente performante [Bergevin et al*.,* 1996]. Ovviamente, essendo i calcoli basati su procedure ai minimi quadrati, l'allineamento iniziale è fondamentale per ridurre i tempi di esecuzione e garantire un buon risultato; analogamente, è altrettanto importante la dimensione delle aree di sovrapposizione tra le singole scansioni che, generalmente, copre almeno il 10-20% dell'area totale della loro unione [Pesci et al*.,* 2015a]. Le procedure utilizzate permettono di avere errori di allineamento molto più piccoli delle precisioni delle singole misure; in questo modo l'unione di tutte le nuvole di punti non risentirà della propagazione degli

errori in quanto l'errore totale sarà sotto al livello di rumore del rilievo TLS. La verifica sulla bontà dell'allineamento non è oggetto del presente lavoro, ma l'eventuale presenza di errori sistematici nel montaggio delle scansioni potrebbe compromettere la realisticità dei modelli finali causando una distorsione che renderebbe difficile, nel confronto tra misure eseguite in epoche diverse, riconoscere vere deformazioni o variazioni del terreno. L'errore medio di allineamento ottenuto è di circa 5 mm ed equivale mediamente al 10% del passo di campionamento utilizzato per ogni scansione.

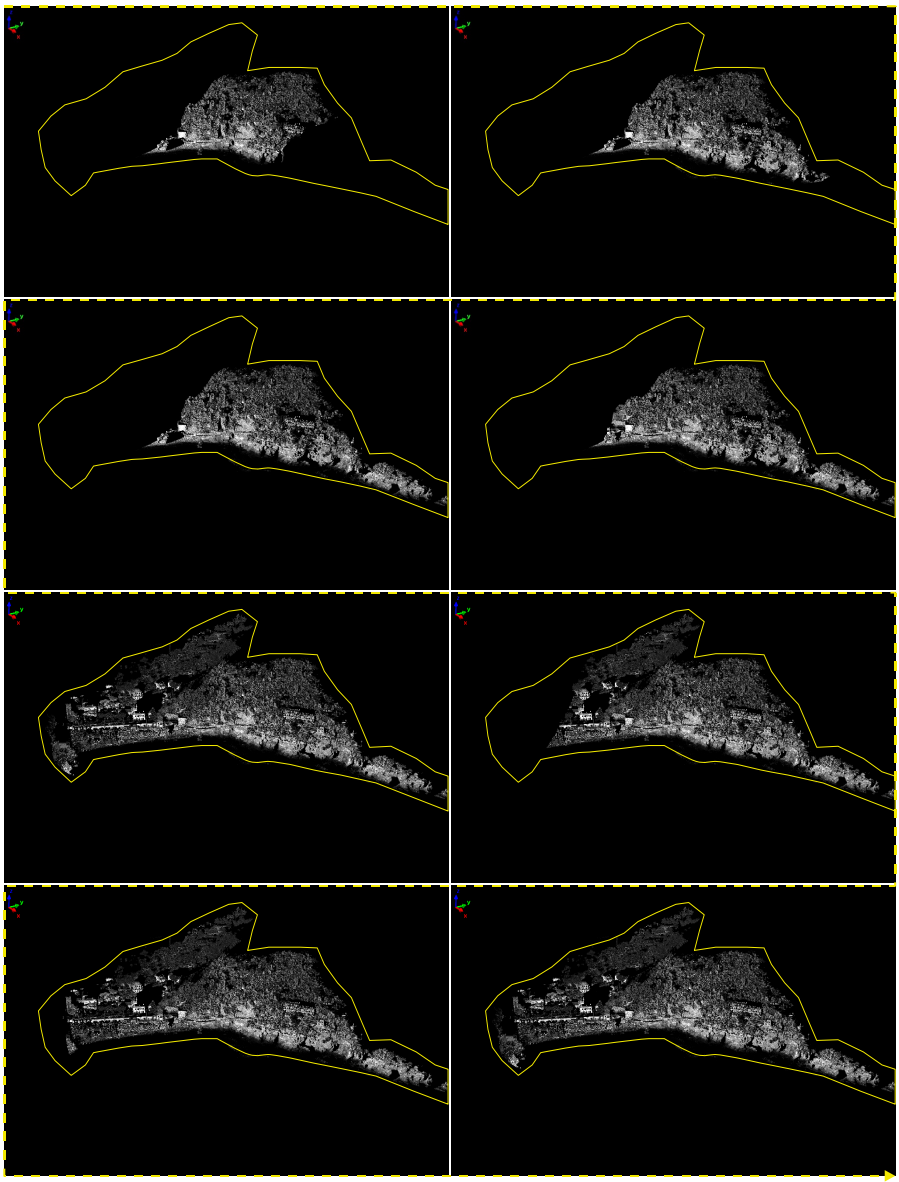


Figura 7. Nuvole di punti allineate progressivamente.

Nella figura 8 vengono sovrapposti dettagli di aree specifiche alla globalità della nuvola di punti del rilievo complessivo; ciò risulta utile ad una immediata percezione delle densità e risoluzioni ottenute nel rilievo.

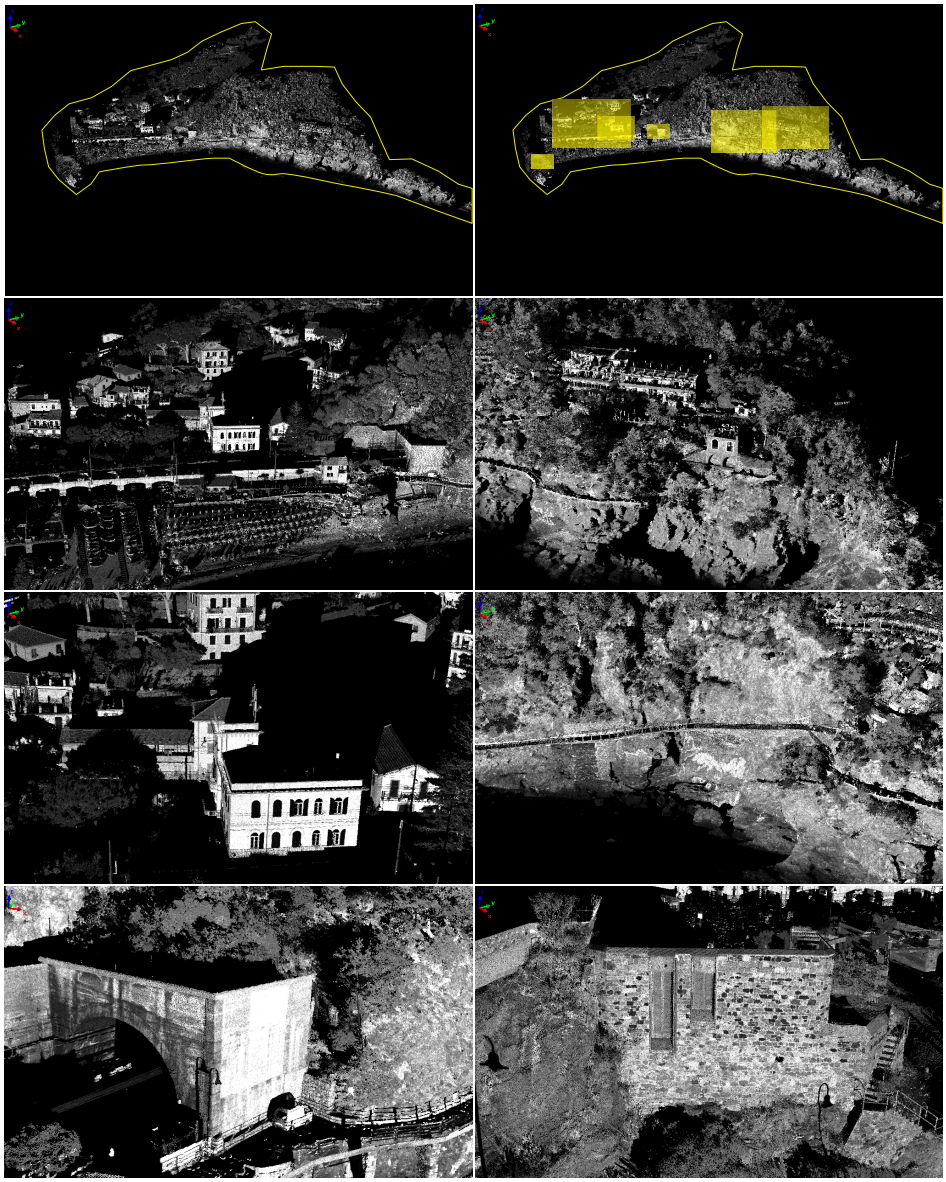


Figura 8. L'area indagata e dettagli delle nuvole di punti.

L'area relativa al sito 2 (figura 4) è stata rilevata da due punti di osservazione distanti tra loro: il primo al limite di un parcheggio proteso sul mare, il secondo dall'estremità del molo che delimita un circolo nautico privato. La porzione più ampia della costa indicata in figura 9a è stata rilevata dalla prima stazione attraverso tre scansioni indipendenti e parzialmente sovrapposte per l'allineamento; le distanze strumento-oggetto variano in questo caso tra 250 m e 400 m. La seconda stazione ha invece permesso di realizzare un rilievo più dettagliato delle pareti verticali che insistono sull'abitato. Si sottolinea che le pareti sono rivestite di una rete metallica a prevenzione di frane, smottamenti e crolli di parti rocciose. Analogamente a quanto descritto in precedenza, anche in questo caso si mostrano le nuvole di punti e le immagini relative alle aree acquisite (figura 9).

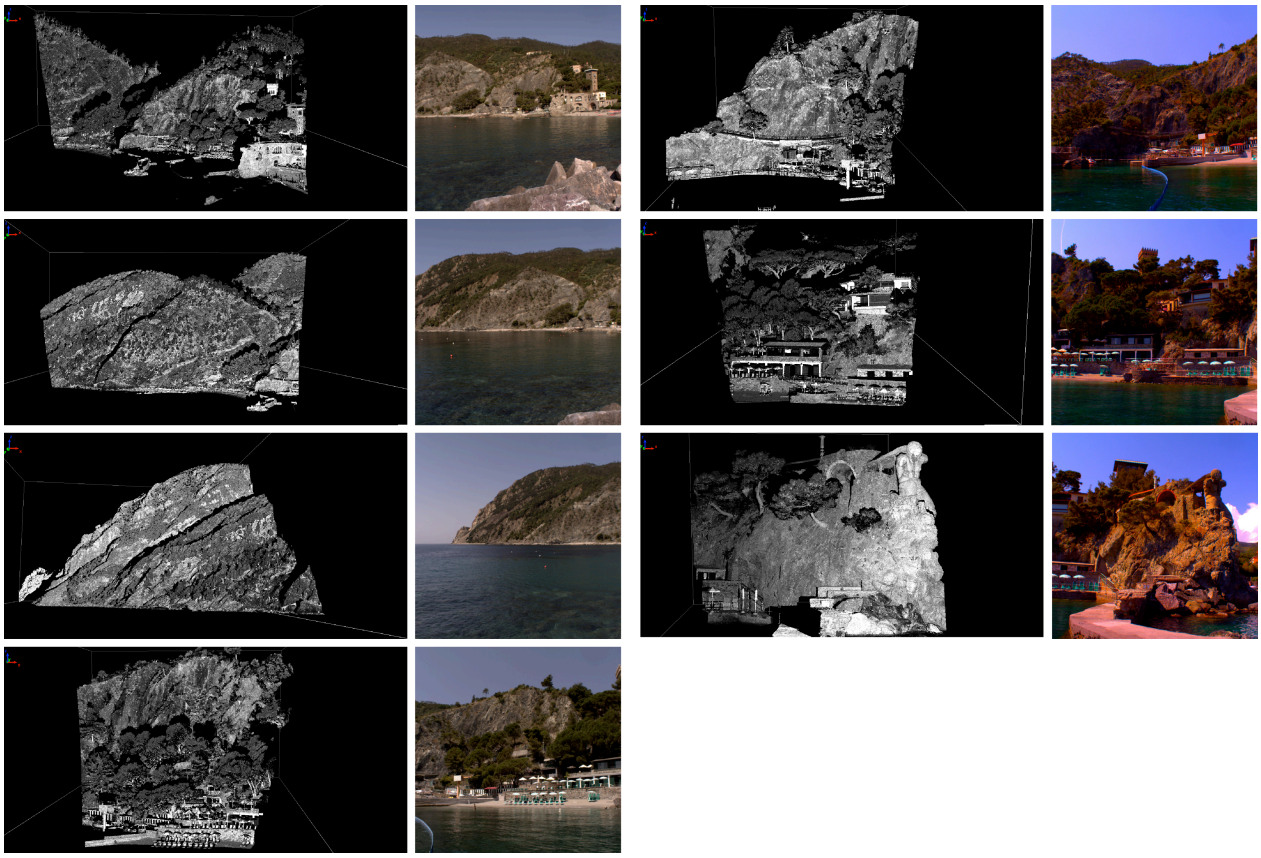


Figura 9. Scansioni del sito 2 misurate dal parcheggio e dal molo del circolo velico.

In figura 10 (ab) si mostra la progressione dei lavori di allineamento e, come in precedenza, alcuni dettagli per osservare in modo diretto il contenuto informativo disponibile ed il livello di risoluzione ottenuto. Le distanze tra lo *scanner* e le pareti osservate sono risultate comprese tra 350 m e 750 m, per le scansioni effettuate dalla postazione sul parcheggio mentre, le aree prospicienti il circolo nautico sono state rilevate dalle seconda postazione con portate inferiori variabili tra 50 m e 150 m. La zona mostrata nella figura ha un passo di campionamento di circa 2-3 cm.

Inoltre, viene riportato il dettaglio del Gigante (figura 11), una scultura di cemento armato costruita nel 1910 che si affaccia sulla spiaggia, oggi ridotta al solo tronco; le gambe e le braccia sono andate perdute durante i bombardamenti dei conflitti bellici e a causa delle forti mareggiate che insistono di frequente sulla costa. Questa scansione, realizzata con un passo di campionamento di circa 3 mm da una distanza approssimativa di 30 m, servirà quale modello test per validare le prestazioni del metodo SfM speditivo da terra e, nei successivi paragrafi, saranno mostrati i risultati.

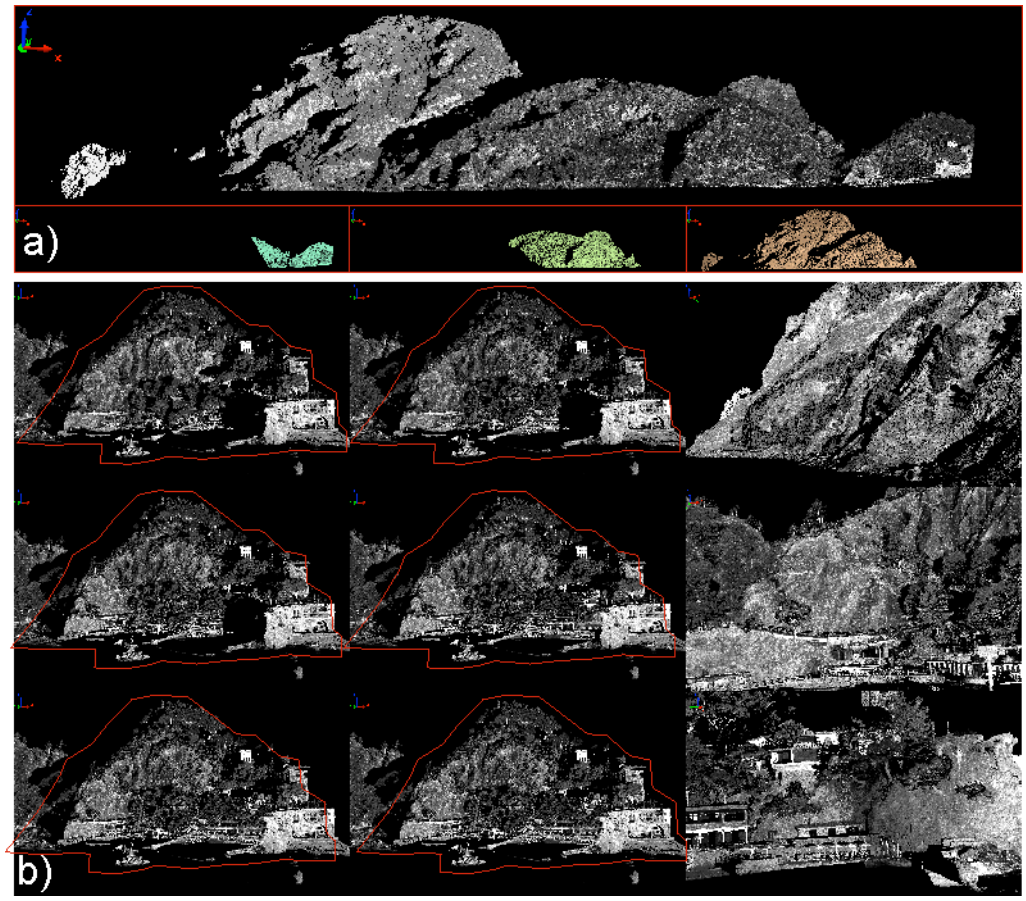


Figura 10. Allineamento delle scansioni e dettagli: a) nuvole di punti dell'area complessiva nelle aree di costa più lontane; b) nuvole di punti nella progressione di allineamento per la zona più vicina, area del circolo nautico e versante. Inoltre sono mostrati alcuni zoom delle nuvole di punti per osservare in via diretta la quantità di dettaglio disponibile.

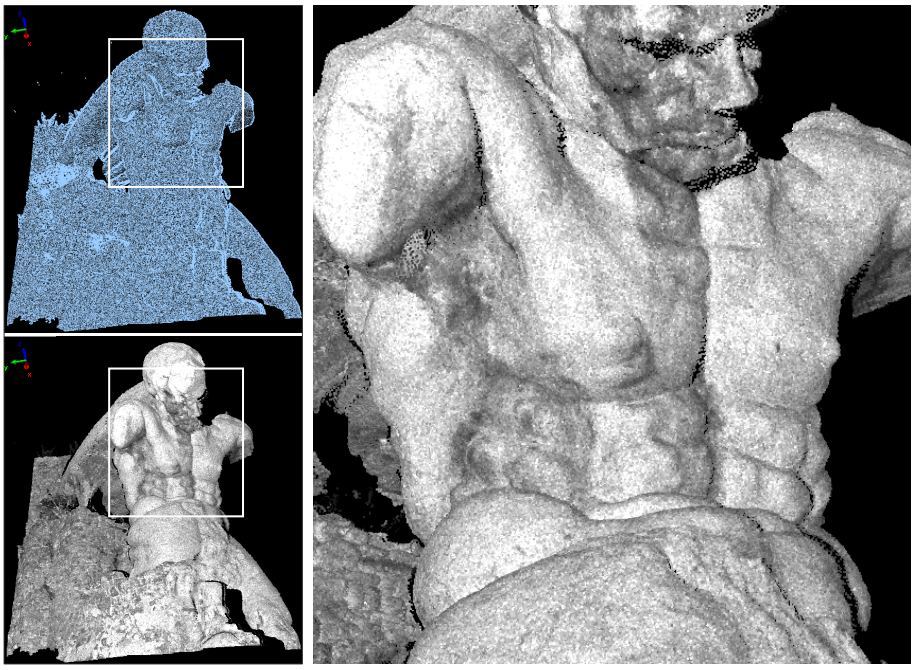


Figura 11. Particolare architettonico della nuvola di punti: la scultura del Gigante.

3.1 Considerazioni sulle misure TLS

Com'è noto, le misure TLS di natura statica permettono di ottenere le coordinate di milioni di punti distribuiti sulle superfici fisiche di interesse in tempi brevi ed in un sistema di riferimento relativo che ha l'origine nel centro strumentale e gli assi sono orientati come le direzioni principali dello strumento. Il centro strumentale è, semplificando lo schema di funzionamento, il punto che riceve il segnale *laser* e gli assi sono, nel caso specifico, le normali alle facce dello strumento (figura 5).

Questo significa che per ogni scansione, anche se effettuata dalla stessa posizione, si ottengono nuvole di punti non allineate tra loro poiché l'origine e l'asse del sistema di riferimento è ogni volta associato alla singola misura. Le misure TLS forniscono un modello in uno spazio relativo ma, cosa essenziale, metrico: una nuvola di punti, presa nella sua natura di insieme relativo di coordinate, rappresenta con buona precisione la realtà dell'osservato.

Nei rilievi mostrati in precedenza si osserva chiaramente il buon dettaglio delle nuvole di punti ma le misure sono state fortemente limitate dall'impossibilità di posizionare lo *scanner* in stazioni ottimali. Di fatto, le uniche zone che hanno consentito una vista la più possibile frontale sono state essenzialmente i moli. Va notato che, proprio per questi limiti imposti dalla logistica dell'acquisizione, non è stato possibile effettuare misure complete e gli effetti delle ombre sono pertanto notevoli: pur distanziando lo *scanner* dalle aree obiettivo, certi settori rimangono comunque impossibili da acquisire (vedi figure 12 e 13).

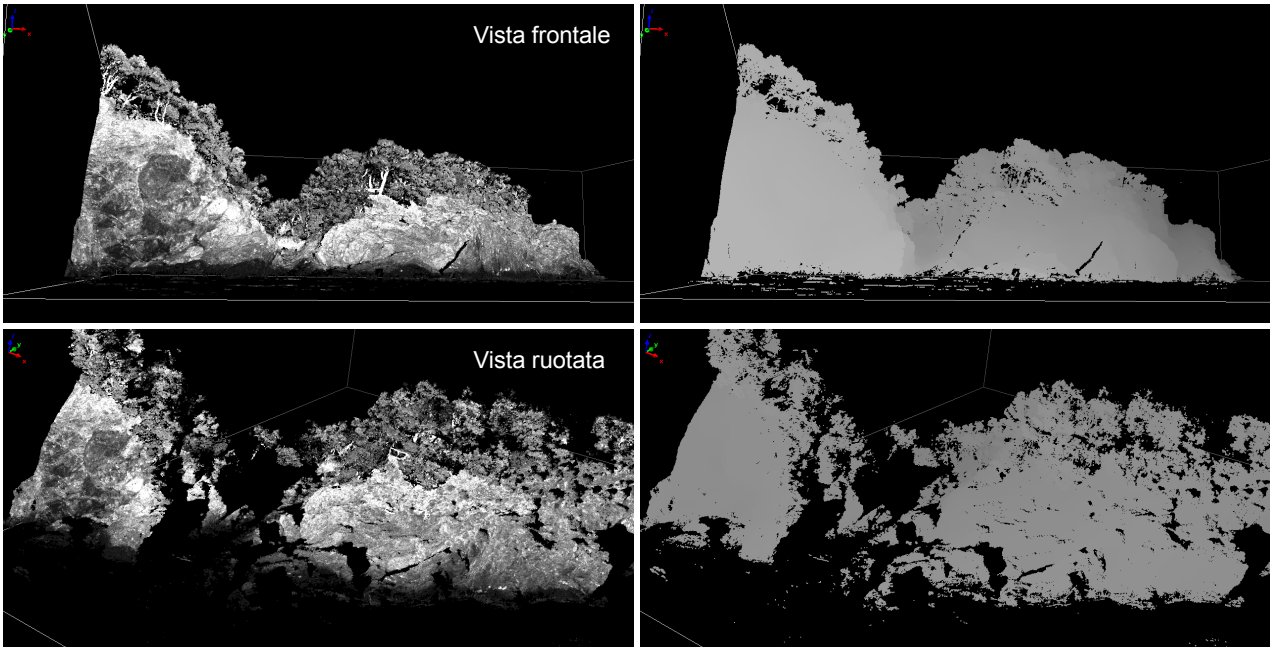


Figura 12. Nuvola di punti (quarta scansione in figura 5) del sito 1 mostrata in vista frontale, direzione del fascio al momento del rilievo, e ruotata. Nel secondo caso si osserva la mancanza di dato. La nuvola è mostrata, nelle due viste, con e senza la colorazione (toni di grigio) dell'intensità per osservare le zone d'ombra in modo più netto.

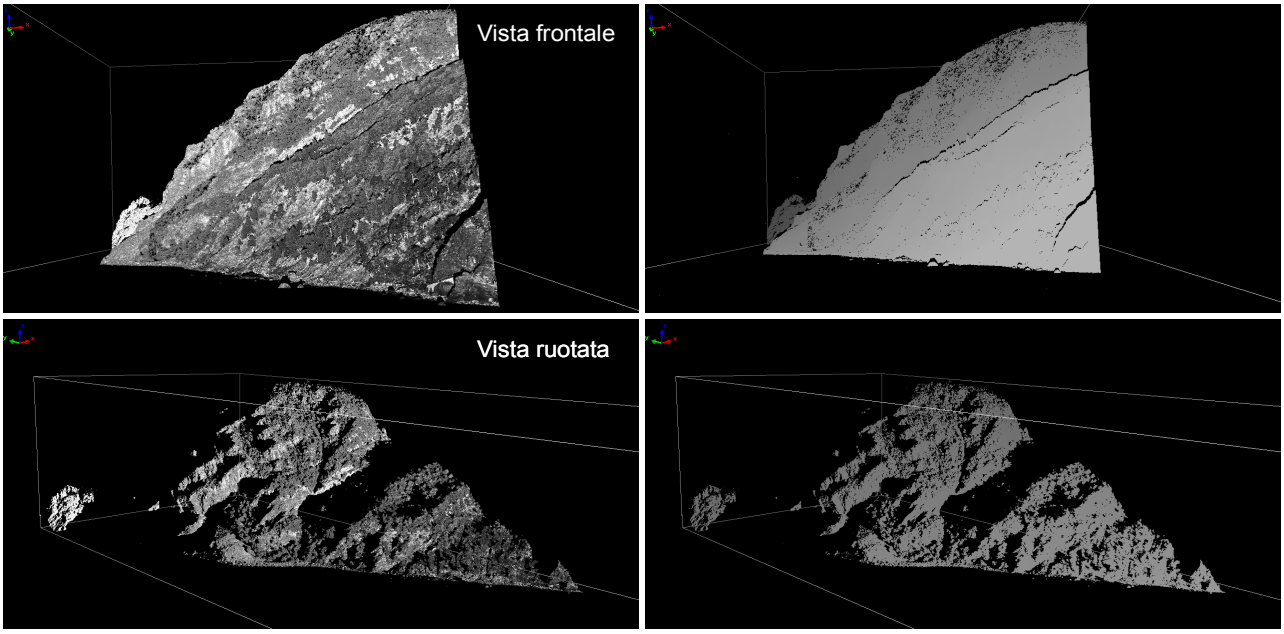


Figura 13. Nuvola di punti (terza scansione in figura 9) del sito 2 mostrata in vista frontale, direzione del fascio al momento del rilievo, e ruotata. Nel secondo caso si osserva la mancanza di dato.

In via preliminare, è semplice osservare la distribuzione del dato di intensità del segnale sulla costa. Tra le peculiarità dello strumento utilizzato spicca la lunghezza d'onda del laser di circa 1500 nm, tale da comportare un picco di assorbimento in corrispondenza di acqua o di materiale molto bagnato. Ne consegue una riduzione dell'intensità del segnale di ritorno e ovvie limitazioni che, in realtà, per scopi particolari sono estremamente interessanti. Nel caso specifico, osservando con attenzione la figura 14, è immediato comprendere come la selezione di punti caratterizzati da bassi valori di intensità renda possibile identificare fasce di costa evidentemente bagnate dal mare e quindi più o meno soggette all'erosione. In occasione di uno studio sul cratere del Vesuvio e relative analisi dati [Pesci et al., 2008 abc; Pesci et al., 2011ab] si è potuto verificare che, nonostante i dati di intensità siano relativi (il dato grezzo di ampiezza del segnale viene automaticamente scalato e convertito in una scala di valori 0-255 e quindi visualizzato in toni di grigio), nell'ambito di singole scansioni possono essere considerati stabili e indipendenti dall'angolo di incidenza del fascio *laser*. Esistono procedure [Kaasalainen et al., 2009; 2011] per normalizzare questi valori su una o più scansioni, cosa per altro solo parzialmente possibile nelle operazioni di conversione dati mediante il *software parser.exe* [Pesci et al., 2009]. Tale *software*, è specificatamente realizzato per trasformare il dato formato macchina di ILRIS 3D in un dato di input al *software* Polyworks. Studi precedenti dimostrano che i materiali irregolari, cioè naturali, risentono poco, in termini di intensità di ritorno, dell'angolo di incidenza (direzione del fascio *laser* sulla superficie) per cui, correlare il dato estratto in base ai valori di intensità, è una operazione che si può effettuare anche su vaste aree rilevate senza incorrere in grossolani errori di interpretazione [Pesci et al., 2008a]. Le condizioni climatiche generali al momento della scansione possono influire fortemente sulla risposta di intensità per cui nel prosieguo sarà utile lavorare sulle differenze e sui contrasti dei valori lungo la parete più che su intervalli specifici di selezione. Questo tema sarà approfondito nell'ambito del progetto e qui viene solo accennato per mostrare le possibilità offerte da questo tipo di informazione.

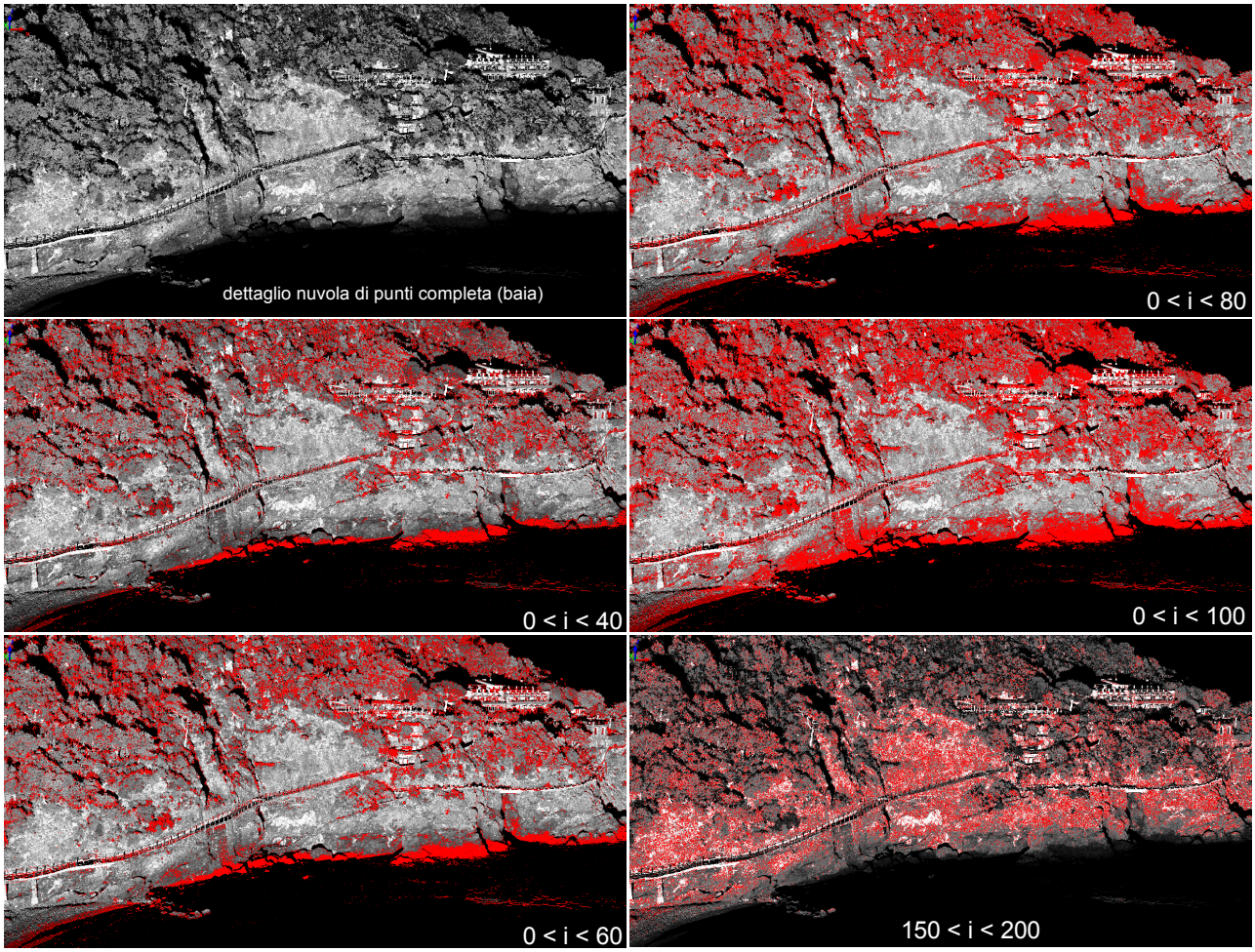


Figura 14. Esempio di analisi radiometrica ed estrazione di informazioni da una nuvola di punti risultante dall'unione di più scansioni. Si mette in evidenza l'intensità degli impulsi di ritorno strettamente correlata alla rugosità dei materiali illuminati, all'irregolarità della superficie (intesa come rugosità macroscopica) ed al contenuto di acqua. Nelle figure notiamo che le selezioni dei punti con bassa intensità mettono in risalto i livelli in cui le rocce sono bagnate dal mare e, naturalmente, la vegetazione. Non è semplice fornire una interpretazione dei valori in quanto di carattere relativo ma, in linea di massima, quelli superiori a 150 indicano materiali molto riflettenti.

4. TLS e SfM

4.1 Test TLS/SfM da misure terrestri

La fotogrammetria SfM utilizza gli stessi principi base della fotogrammetria stereoscopica tradizionale; una struttura tridimensionale può essere ricostruita da una serie di immagini acquisite da un adeguato numero di punti di vista, ben distribuiti spazialmente attorno all'oggetto stesso, e con un'adeguata sovrapposizione (ogni singola area dell'oggetto da ricostruire deve essere ripresa da almeno due posizioni diverse e angolarmente spaziate rispetto ad essa). Ciononostante la SfM è una tecnica rivoluzionaria perché la geometria della scena, le posizioni e l'orientamento delle fotocamere ed i parametri di calibrazione intrinseci della camera, possono essere automaticamente e simultaneamente calcolati mediante algoritmi di calcolo avanzato. L'algoritmo di tipo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) [Lowe, 1999] individua in modo automatico i punti omologhi tra due immagini mediante: (i) riconoscimento in ciascuna immagine di particolari quali intersezioni tra linee, spigoli o altro; (ii) memorizzazione dell'intorno di ciascun particolare individuato; (iii) confronto tra gli intorni dei punti individuati nelle due immagini e conseguente individuazione dei punti probabilmente omologhi; (iv) esclusione delle false coppie di punti omologhi mediante la tecnica *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC) [Fischler and Bolles, 1981] nella quale, alcune coppie di candidati punti omologhi sono scelte in modo casuale e utilizzate per individuare la corrispondente

trasformazione geometrica tra le due immagini. Le coppie rimanenti sono utilizzate per testare tale trasformazione, ripetendo più volte la procedura fino ad ottenere un numero adeguato di coppie valide (*inliers*). L'individuazione automatica dei punti omologhi richiede che il rilievo dell'esterno di un edificio o di una superficie naturale sia eseguito molto rapidamente in modo da prevenire effetti dovuti al cambiamento dell'illuminazione solare. Il risultato del processamento di immagini mediante SfM è una nuvola di punti molto densa e foto-realistica, cioè con colore reale.

Di seguito vengono mostrati i risultati di un confronto tra la tecnica TLS e la fotogrammetria SfM. Per supportare questa comparazione si è scelto come *target* di riferimento la statua del Gigante e sono stati elaborati i rispettivi *data set*. Le immagini digitali sono state acquisite con una camera Nikon D5000 (tabella 1) in dotazione alla Sezione INGV di Bologna ed elaborati secondo la tecnica SfM. Uno degli obiettivi del progetto è la creazione di un *data base* completo di tutta la costa di interesse e, per ottenerlo, si è reso necessario integrare dati di diversa natura. In via preliminare, è stato eseguito un rapido test sull'affidabilità del modello SfM ottenuto dall'analisi di 27 foto scattate da posizioni non note nell'intorno della scultura a distanze di circa 10-20 m.

Modello	Unità di misura	Nikon D5000
Sensore		CMOS
Matrice di pixel	px x px	4288 x 2848
	Mpx	12.2
Risoluzione orizzontale	dpi	300
Risoluzione verticale	dpi	300
Profondità	bit	24
Distanza focale	mm	32
Numero f		f/5.6
Esposizione	s	1/125
Sensibilità	ISO	220

Tabella 1. Caratteristiche della camera Nikon D5000.

Nella figura 15 sono mostrate le immagini che riguardano solo un lato dell'area completa, in quanto acquisite dal molo sottostante. Le analisi sono state realizzate mediante il *software* Photoscan [Agisoft, 2015]: sono state quindi calcolate le posizioni e gli orientamenti di ogni immagine nello spazio relativo attorno alla scultura e, infine, è stata estratta una densa nuvola di punti dell'area in esame. Se le immagini utilizzate sono buone dal punto di vista dell'illuminazione e della risoluzione, in teoria, il modello ottenibile sarà completo e realistico a meno della correzione del fattore di scala. La nuvola di punti SfM, quindi, dovrà essere scalata applicando un fattore di scala adeguato. Questa operazione è stata effettuata costruendo delle polilinee, cioè linee ottenute dalla congiunzione di punti omologhi riconosciuti sia nella nuvola di punti SfM che in quella TLS, e calcolandone il rapporto. Nel caso specifico è stata creata una linea chiusa formata da segmenti a congiungere alcuni punti riconosciuti nella cornice dell'arco dietro alla statua con dettagli specifici dello zigomo e del tronco della stessa. Una volta riportata alle dimensioni reali, la nuvola di punti è stata trattata secondo le modalità tipiche delle analisi di dati TLS e quindi è stata allineata al modello TLS e sono state calcolate le differenze tra i punti che, come mostrato in figura 16, sono contenute abbondantemente nell'intervallo [-2; 2] cm. I valori sono compatibili con la risoluzione TLS e con la dimensione del pixel delle immagini che, nel caso specifico, sono pari a circa 5 mm.



Figura 15. Insieme delle immagini utilizzate come input per Photoscan (Agisoft).

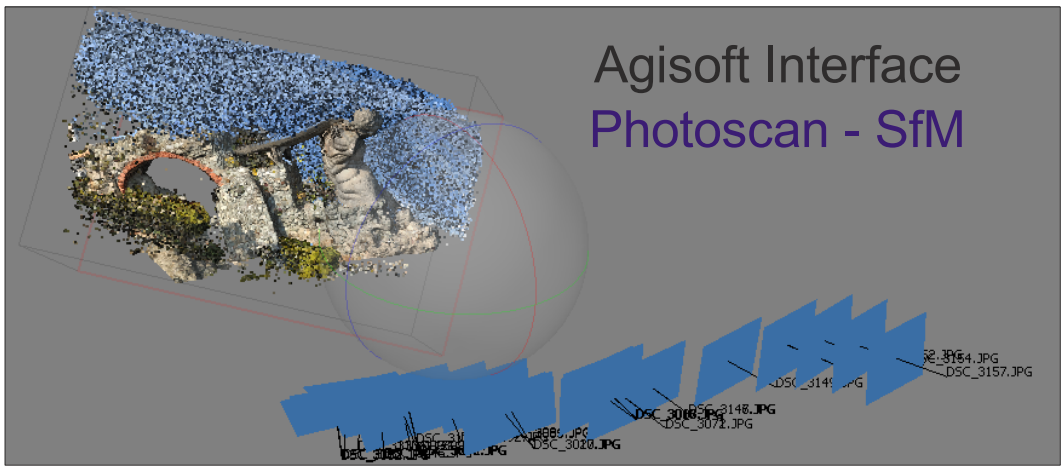


Figura 16. Interfaccia *software* Photoscan (Agisoft): la posizione della camera digitale nello spazio è ricostruita nello spazio relativo e mostrata con i rettangoli blu.

Il punto cruciale è trasformare il sistema relativo nel quale vengono ottenuti i modelli mediante SfM in un sistema metrico; in generale, è necessario operare una trasformazione ed una delle più utilizzate è quella di Helmert, cioè una rototraslazione con fattore di scala basata sulla corrispondenza tra una serie di coppie di punti appartenenti ai due sistemi (quello della nuvola di punti ottenuta mediante SfM e quello definitivo, in questo caso quello della nuvola di punti da TLS). Per affinare il calcolo del fattore di scala si può attuare un confronto di polilinee tracciate collegando i punti omologhi nei due sistemi di riferimento calcolandone il rapporto [Pesci et al., 2015a].

Le nuvole di punti SfM, composte dall'informazione geometrica e radiometrica (x, y, z, r, g, b) sono state importate in Polyworks e trattate secondo le tipiche procedure di analisi dati TLS: 1) ispezione tramite Modulo IMInspector e identificazione dei punti riconoscibili anche nella scansione. Tali punti sono stati utilizzati per creare delle polilinee e dal confronto delle lunghezze è stato calcolato il fattore di scala; 2) trasformazione della nuvola SfM per adattarla alle misure reali; 3) allineamento del modelli TLS e SfM all'interno del modulo IMAlign; 4) calcolo delle differenze tra i punti. Nella figura 17 si mostrano i risultati come mappa delle differenze e le nuvole di punti utilizzate.

I risultati sono soddisfacenti poiché non risultano differenze significative tenendo conto della rapidità nella conduzione delle misure. Compaiono solo alcuni valori discordanti nell'ordine di 2 cm nelle zone in cui, di fatto, i dati *laser* risultavano acquisiti con sfavorevoli angoli di incidenza e dove le immagini digitali avevano un scarsa sovrapposizione.

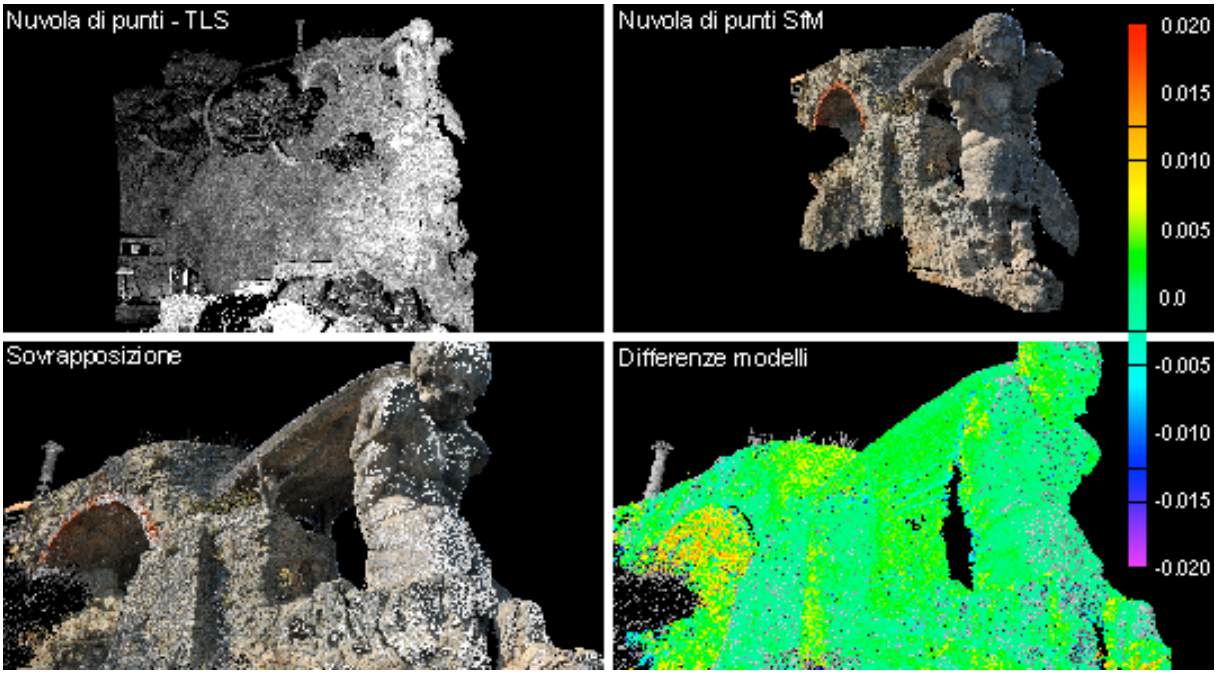


Figura 17. Le nuvole di punti TLS e SfM, chiaramente distinguibili per il contenuto di luminosità (scala di grigi) e RGB (foto realistica). Le differenze (espresse in m) sono prodotte in una scala di colore arcobaleno ed i valori variano tra +/- 2 cm.

4.2 Validazione modelli SfM

Nell'intento di utilizzare il *data set* TLS statico per validare ed analizzare dati ottenuti da metodologie differenti, nello specifico la fotogrammetria digitale da piattaforma mobile, si è inizialmente concepita l'idea di utilizzare *target* artificiali, immaginati come elementi di misure note, leggeri ma di grandi dimensioni, da installare nelle aree di costa accessibili, coprendo spazialmente l'area di interesse. Il confronto tra l'insieme delle coordinate dei punti estratti dalle superfici dei *target* può fornire, in modo semplice e diretto, le informazioni sulla precisione e sulla ripetibilità delle misure. Se nelle aree costiere sono presenti elementi architettonici, fatto abbastanza normale nei comuni turistici e fortemente urbanizzati come Monterosso, tali elementi possono essere utilizzati in sostituzione dei *target* artificiali. I prospetti degli edifici (figura 18) sono estremamente versatili in quanto le notevoli dimensioni permettono di rilevarli anche

se la densità di misura non è elevata; i rivestimenti sono brillanti e quindi le superfici ben visibili sia dall'intensità del rilievo TLS che dal contenuto radiometrico RGB delle immagini fotografiche; la geometria è precisa e ben misurabile grazie alle forme nette ed ai dettagli (porte, finestre, ecc).

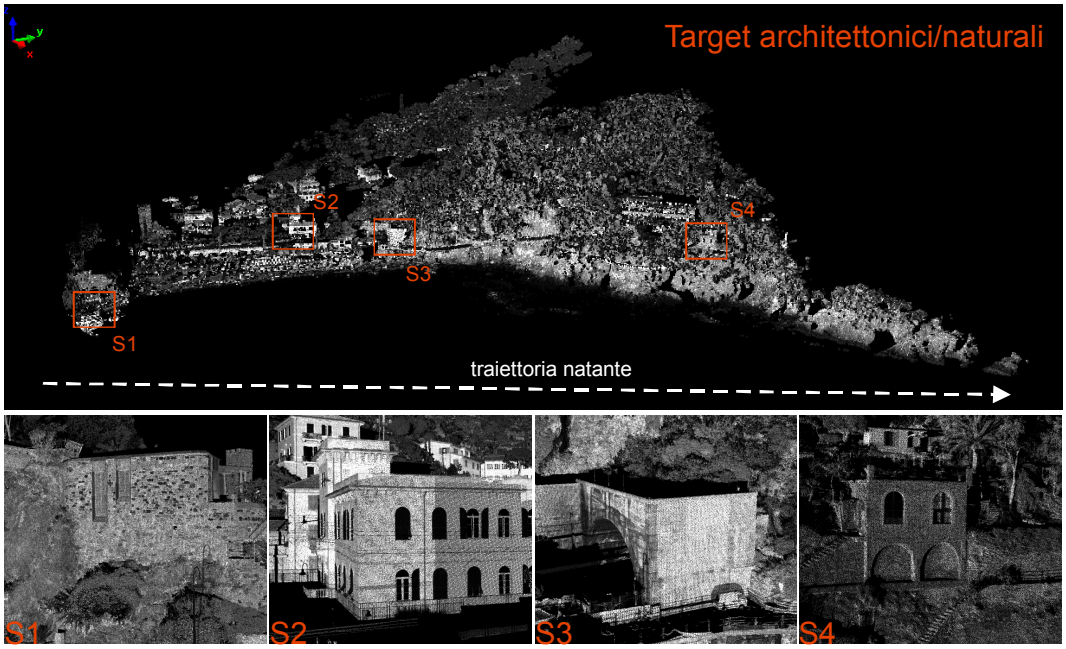


Figura 18. La nuvola di punti TLS del sito 1 e la scelta dei *target.*

Il sito1 è stato rilevato con TLS quasi completamente, nonostante alcune zone di dato mancante causate dall'impossibilità di occupare punti di stazione molto distanti tra loro e distribuiti nello spazio in maniera non ottimale. Dalla nuvola di punti sono state selezionate alcune sottozone in relazione agli edifici-*target* scelti per i confronti successivi da effettuarsi con i modelli geometrici ottenuti dai rilievi SfM realizzati da barca e/o drone, ad una distanza di circa 100-200 m dalle superfici di interesse. Sono state utilizzate, rispettivamente, le camere digitali Nikon D750 e la camera SonyNex-7 con caratteristiche tecniche che comportano, ad una distanza di presa di 50 m, un pixel a terra di circa 6mm e 12 mm.

.In figura 19 le nuvole di punti TLS e SfM sono rappresentate con i caratteristici colori dati da intensità e RGB e sono messe in evidenza le parti utilizzate per il confronto su elementi architettonici (punti selezionati di colore rosso). La statistica delle differenze tra le coordinate dei punti rappresentativi degli stessi *target* mostra valori medi di alcuni centimetri e deviazioni standard sulle tre componenti delle coordinate variabili tra 10 e 20 cm. Questi valori sono in accordo sia con la risoluzione delle nuvole di punti TLS, in termini di passo di campionamento e impronta del fascio, che con la grandezza del pixel delle immagini fotogrammetriche il cui valore si può stimare in circa 10-15 cm.

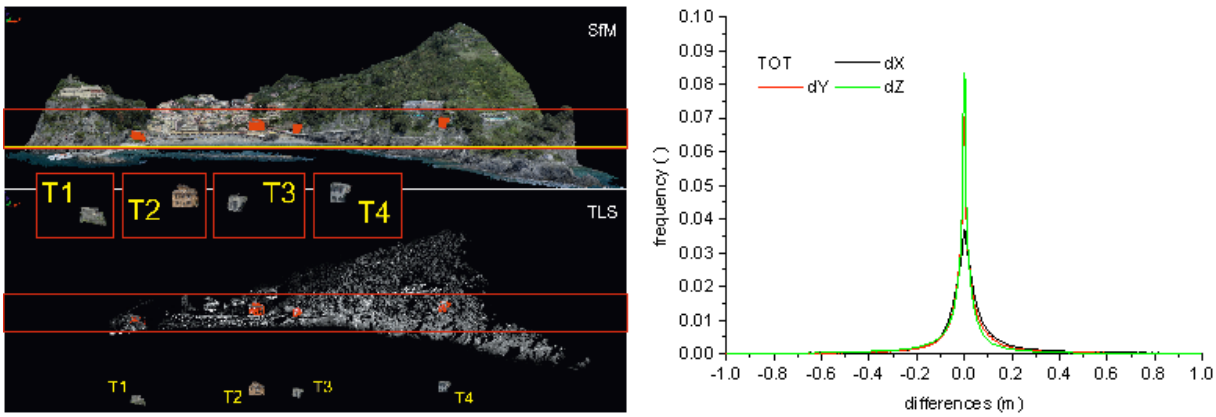


Figura 19. Confronto tra il rilievo TLS e SfM con l'utilizzo dei *target* architettonici.

La media dei valori delle differenze sulle tre componenti x, y e z è distribuita attorno allo zero, cosa importante per escludere sistematismi nel calcolo dei punti su un'area relativamente estesa. Gli errori sono di una certa rilevanza, trattandosi di valori superiori a 10 cm ma lo stesso confronto effettuato su immagini acquisite a distanze più ravvicinate mostra un risultato assai più preciso, come illustrato in figura 20. Infatti, con l'analisi di una decina di immagini ottenute ad una distanza di circa 10-20 m, le differenze si riducono di quasi un ordine di grandezza e, nonostante si possano notare pattern nella mappa delle differenze soprattutto nelle zone di discontinuità come angoli, spigoli (etc.) si osservano deviazioni standard contenute in circa 2 cm.

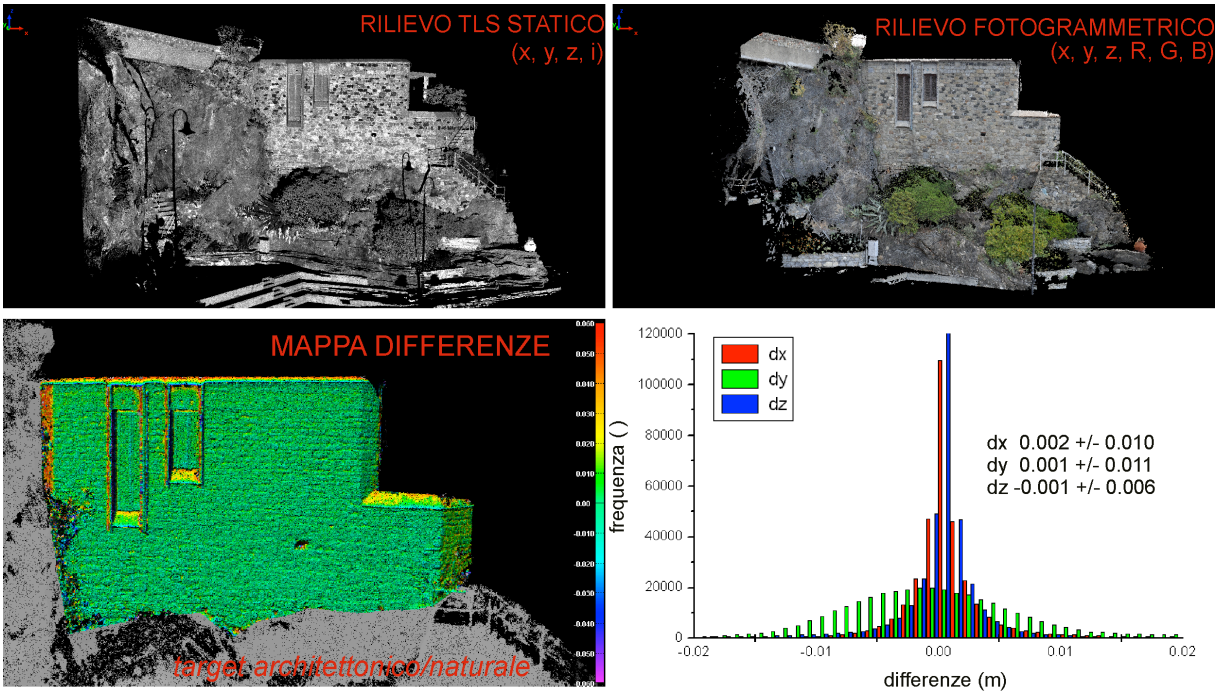


Figura 20. Confronto tra il rilievo TLS e SfM con l'utilizzo dei *target* architettonici in una misura ravvicinata e ottenuta con sovrabbondanza di immagini. Le nuvole di punti TLS e SfM, la mappa delle differenze ed il grafico con la statistica (distribuzione) delle differenze sono mostrati in figura.

Come la precisione o risoluzione della nuvola di punti dipenda dalla distanza di rilievo, a parità di camera utilizzata, è un indicatore importante poiché è possibile immaginare di effettuare analisi più mirate di zone in cui sia auspicabile un dettaglio maggiore e ciò può essere ottenuto semplicemente con una serie di immagini acquisite a ridosso delle aree di interesse.

5. Conclusioni e *work in progress*

Nel lavoro vengono presentati nel dettaglio i rilievi TLS di alcune zone della fascia costiera di Monterosso (località delle Cinque Terre) che verranno inseriti nel *data set* del Progetto SCANCOAST. Tale Progetto, finalizzato alla mappatura in alta definizione di aree soggette a potenziale instabilità di natura idrogeologica, prevede anche acquisizioni di dati di fotogrammetria digitale e *multibeam* interferometrico.

Il rilievo TLS, ottenuto con lo strumento ILRIS 3D, ha interessato due siti che ricoprono circa il 40% dell'intera area costiera nonostante zone di dato mancante, dovute all'impossibilità logistica di installare lo strumento in punti opportuni. Nonostante ciò, la densità delle nuvole di punti acquisiti risulta tale da consentire una buona integrazione con i dati ottenuti da tecniche di fotogrammetria digitale acquisite sia da piattaforma mobile volante (drone) che natante (imbarcazione).

Nella prima parte del rapporto sono trattate le procedure riguardanti nel dettaglio la tecnica di acquisizione, l'elaborazione del dato e la produzione dei modelli TLS. Considerando l'elevata accuratezza di tale tecnica (1-2 cm) sono state applicate alcune procedure per valutare la precisione di modelli ottenuti da

fotogrammetria digitale quali immagini da drone e imbarcazione. In particolare, la validazione è stata effettuata sul Sito 1 per la presenza di numerosi *target* artificiali (edifici). La statistica delle differenze tra le coordinate dei punti rappresentativi degli stessi *target* tra modello TLS e modello SfM da imbarcazione mostra valori medi di alcuni centimetri e deviazioni standard (sulle tre componenti delle coordinate) variabili tra 10 e 20 cm. Questi valori sono in accordo sia con la risoluzione delle nuvole di punti TLS, in termini di passo di campionamento e impronta del fascio, che con la grandezza del pixel delle immagini fotogrammetriche il cui valore si può stimare, mediamente, in circa 10-15 cm. Quanto effettuato sinora all'interno del progetto SCANCOAST rappresenta solo l'inizio di un possibile piano operativo futuro che potrebbe prevedere:

1) la ri-misurazione dei siti in oggetto mediante TLS dagli stessi punti di acquisizione e con le stesse caratteristiche di rilievo per un monitoraggio dell'area di costa che insiste sulle zone abitate;
2) il confronto di modelli multi-temporali mirato all'individuazione di differenze significative morfometriche che possa essere messo in relazione con deformazioni, crolli o distacchi di elementi di roccia;
3) la mappatura del contenuto radiometrico a mezzo di selezione di valori dell'intensità del segnale di ritorno, previa una normalizzazione dei dati, per riconoscere le zone di accumulo di acqua dovuta a precipitazioni o cattivo drenaggio;
4) la creazione, da misure multi temporali allineate, di un insieme di curve di livello che identificano il passaggio tra valori a bassa ed alta intensità del segnale per evidenziare l'effetto del mare sulle pareti, causa principale di fenomeni di erosione;
5) la validazione dei modelli ottenuti da fotogrammetria digitale e la verifica del fattore di scala calcolato, in prima istanza, utilizzando le coordinate di punti GPS;
6) la stima di un errore sul modello fotogrammetrico calcolato dal confronto con i dati TLS e dalla statistica delle differenze nelle zone non vegetate (cioè le zone in cui il rumore strumentale può alterare la comprensione del dato).

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i colleghi Riccardo Vagni (Portovenere) per aver prestato supporto tecnico nelle misure TLS e Marco Anzidei (Roma) per aver fornito le immagini acquisite da imbarcazione.

Un sentito ringraziamento all'Assessore Emanuele Raso ed alla Polizia Municipale di Monterosso per la disponibilità e per l'aiuto logistico durante il lavoro.

Bibliografia

Bergevin R., Souci M., Gagnon H., Laurendeau D., (1996). *Towards a general multi-view registration technique*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and. Machine Intelligence 18 (5), 540-547.

Bisson M., Fornaciai A., Mazzarini F., (2007). *A geographic database used for GIS applications*. SITOGEO. doi 10.1393/ncc/i2007-10243-9.

Bortolotti V., Principi G., Treves B., (2001). *Ophiolites, Ligurides and the tectonic evolution from spreading to convergence of a Mesozoic Western Tethys segment*. CAP 11, 151-164, Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins, Kluwer Academic Publischers.

Brock J.C. and Purkis S.J., (2009). *The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management.* Journal of Coastal Research: Special Issue 53, 1- 5.

Cerrina A., Ferroni A., Martinelli P., Ottria G., (1995). *La posizione dei FLYSH ad Elmentoidi (Formazione del M.te Antola e di Ortonovo) nella piega Castelpoggio-Ortonovo a NW delle Alpi Apuane*. Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, scritti e documenti, 14: 181-193.

Cevasco A., (2007). *I fenomeni di instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre (Liguria Orientale)*. Studi Costieri, 13, 93 -109.

Fischler M.A., Bolles R.C., (1981). *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with 22 applications to image analysis and automated cartography*. Communications of ACM, 24(6), 381-395.

Franceschi M., Teza G., Preto N., Pesci A., Galgaro A., Girardi S., (2009). *Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (6), 522-528.

Giammarino S., Giglia G., (1990). *Gli elementi strutturali della piega di La Spezia nel contesto geodinamico dell'Appennino Settentrionale*. Boll. Soc. Geol. It., 109, 683-692.

Hartley H., Zisserman A., (2004). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, New York, 655 pp.

ISPRA, (2011). *Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 - Foglio n. 247 Levanto*. Servizio Geologico d'Italia Roma.

James M.R., Robson S., (2012). *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*. Journal of Geophysical Research 117 (F03017), doi: 10.1029/2011JF002289.

Kaasalainen S., Krooks Z., Kukko A., Kaartinen H., (2009). *Radiometric Calibration of Terrestrial Laser Scanners with External Reference Targets*. Remote Sensing 1(3), 144-158.

Kaasalainen S., Jaakkola A., Kaasalainen M., Krooks A., Kukko A., (2011). *Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: search for correction methods*. Remote Sensing 3 (10), 2207-2221.

Kennedy D.M., Ierodiaconou D., Schimel A., (2014). *Granitic coastal geomorphology: applying integrated terrestrial and bathymetric LiDAR with multibeam sonar to examine coastal landscape evolution*. Earth Surface Processes and Landforms, 39(12), 1663-1674.

Lowe D.G., (1999). *Object recognition from local scale-invariant features*. Proceedings of the International Conference on Computer Vision, vol. 2, pp. 1150-1157.

Michoud C., Carrea D., Costa S., Derron M.H., Jaboyedoff M., Delacourt C., Maquaire O., Letortu P., Davidson R., (2014). *Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy*. Landslide 12 (2), 403-418.

Pesci A., Teza G., Ventura G., (2008a). *Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy)*. Annals of Geophysics, vol. 51, p. 633-653, ISSN: 1593-5213.

Pesci A., Teza G., (2008b). *Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: an experiment for anomalous effects investigation.* International Journal of Remote Sensing, 29, 5749-5765.

Pesci A., Teza G., (2008c). *Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach*. Annals of Geophysics, vol. 51, pp. 839-848, ISSN: 1593-5213.

Pesci A., Casula G., Loddo F., Bianchi M.G., Teza, G., (2009). *Optech ILRIS-3D terrestrial laser scanner: short user guide*. Rapporti Tecnici, 109.

Pesci A., Teza G., Casula G., Loddo F., De Martino P., Dolce M., Obrizzo F., Pingue, F., (2011b). *Multitemporal laser scanner-based observation of Mt. Vesuvius crater: characterization of overall geometry and recognition of landslide events*. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, p. 327-336, ISSN: 0924-2716, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.12.002.

Pesci A., Teza G., Bonali E., (2011a). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. Remote Sensing 3 (1), 167-184.

Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G., Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 185-198.

Pesci A., Bonelli F., Teza G., Peikleos A.L., (2015a). *L'analisi morfologica di dati TLS per individuare variazioni ed irregolarità in relazione allo stato deformativo di un monumento: valutazione del metodo e applicazioni*. Rapporti Tecnici INGV, 305.

Pesci A., Caputo T., (2015b). *Studio per la verifica della bontà di allineamento delle scansioni da rilievo laser scanning: metodologia sperimentale TLS - fase 1*. Rapporti Tecnici INGV, 296.

Pesci A., Teza G., Ninfo A., Ferrulli C., Bonali E., (2015c). *Telerilevamento speditivo mediante laser scanning e moderne tecniche di fotogrammetria digitale*. Rapporti tecnici INGV, 319.

Sgrenzaroli M., Vassena G., (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*. Starrylink Editrice - 2007, Brescia, ISBN 978-88-89720-73-8.

Snavely N., Seitz S.N., Szeliski R., (2008). *Modeling the world from internet photo collections*. International Journal of Computer Vision 80(2), 189-210.

Varnes D.J., (1978). *Slope movement types and processes*. In Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., Landslides - Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176, p. 11-33.

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, 300-314.

Sitografia

Agisoft, (2015). Descrizione del pacchetto software PhotoScan. Disponibile online all'indirizzo: http://www.agisoft.com/ (ultimo accesso: 28.09.2015).

Autorità di Bacino Regionale – Provincia della Spezia, (2013). *Tav. 10 Carta della suscettività al dissesto, scala 1:10.000, Piano di bacino Ambito 19 – Cinque Terre*. Disponibile online all'indirizzo: http://www.provincia.sp.it (ultimo accesso: 10.09. 2015).

Innovmetric, (2015). *Descrizione del pacchetto software PolyWorks*. Disponibile online all'indirizzo: http://www.innovmetric.com (ultimo accesso: 12.05. 2015).

Optech, (2015). *Descrizione e brochure del laser scanner ILRIS 3D*. Disponibile online all'indirizzo: http://www.optech.com (ultimo accesso: 20.03.2015).

ISSN 1590-2595

Quaderni di Geofisica

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

ISSN 2039-7941

rapporti tecnici INGV

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

ISSN 2039-6651

Miscellanea INGV

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione
Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale
Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

http://www.ingv.it



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia