

RAPPORTI TECNICI INGV

Calcolo del fattore di scala nelle analisi
di dati SfM: considerazioni



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

436

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Calcolo del fattore di scala nelle analisi
di dati SfM: considerazioni

*Scale factor for SfM point cloud analysis:
considerations*

Arianna Pesci¹, Giordano Teza², Fabiana Loddo¹

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

²Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia

Accettato 7 maggio 2021 | Accepted 7 May 2021

Come citare | How to cite Pesci A., Teza G. e Loddo F., (2021). Calcolo del fattore di scala nelle analisi di dati SfM: considerazioni. Rapp. Tec. INGV, 436: 1-20, <https://doi.org/10.13127/rpt/436>

In copertina Effetto di un errore di scala (particolare) | Cover The effects due to scale factors (detail)

436

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Nuvole di punti e misure	9
2. Valutazione del fattore di scala da misure GNSS	11
3. Valutazione del fattore di scala da nuvole di punti TLS	11
4. Considerazioni finali	14
Ringraziamenti	15
Bibliografia	15

Riassunto

Le nuvole di punti ottenute dalla fotogrammetria *Structure from Motion* (SfM) necessitano del calcolo di un fattore di scala per essere rese metriche e dunque realmente utilizzabili nelle analisi quantitative. Tale fattore, ricavabile sia nella fase di data processing sia in quella di post processing, è un elemento determinante per poter operare confronti tra modelli 3D multi-temporali e, generalmente, si ottiene integrando i dati SfM con misure di posizione esterne (o di appoggio) di elementi riconoscibili nelle nuvole di punti (punti omologhi) e realizzate in modo indipendente con strumenti di vario genere, ad esempio sistemi di navigazione satellitare GNSS, laser terrestre a scansione (TLS), stazione totale, ecc. In questo lavoro si mostrano due approcci differenti e indipendenti per il riconoscimento, la misura ed il confronto di punti omologhi al fine di calcolare i relativi fattori di scala. Il primo si basa sulla misura di target artificiali mediante navigazione satellitare cinematica in tempo reale (RTK GNSS); il secondo sull'estrazione di punti omologhi da mappe morfologiche TLS. I risultati, influenzati dagli errori delle misure effettuate, mostrano una discrepanza tra i fattori di scala pari a 0.04%. Seppur questo studio riguardi un caso specifico e quindi non sia rappresentativo o esportabile a situazioni generiche, evidenzia la necessità di valutare bene le correzioni applicate per non incorrere in errori di interpretazione nell'ottica di realizzare confronti tra modelli multi-temporali per estrarre informazioni di variazioni superficiali.

Abstract

The point clouds obtained from Structure from Motion (SfM) photogrammetry need a scale factor correction if are used for quantitative evaluations as well as surface variations, volume estimates, and so on. The scale factor is required also for multi-temporal models comparison. It can be achieved using homologous points, that is, points from artificial or natural elements detectable in the point clouds and just measured with independent and external measurements.

In this work two different and independent approaches for the recognition, measurement and comparison of homologous points aimed at calculating the corresponding scale factors are shown. The first approach is based on the measurement of positions of artificial targets by means of real-time kinematic satellite navigation (RTK GNSS); the second one is based on the extraction of homologous points from TLS-based morphological maps. The results, influenced by the errors of the performed measurements, show a 0.04% discrepancy between the scale factors. Although this study concerns a specific case and therefore is not representative or exportable to general situations, it highlights the need to carefully evaluate the corrections applied to the scale factor in order to avoid errors of interpretation and, therefore, allow meaningful comparisons between multi-temporal models aimed at extracting information on surface variations.

Keywords Fattore di scala; Structure form Motion; Precisioni | Scale factor; Structure from Motion; Precisions.

Introduzione

Lo studio delle variazioni superficiali di un sistema naturale (ad esempio, un versante instabile, un cratere vulcanico o una parete rocciosa) o artificiale (ad esempio, un ponte o un edificio di grandi dimensioni) spesso si basa sul confronto di modelli 3D multi-temporali co-registrati, ossia

allineati nello stesso sistema di riferimento, al fine di mettere in evidenza le zone che hanno subito deformazione [Pesci et al., 2011; 2020]. Anche in funzione dell'entità delle deformazioni attese nel tempo di ritorno e, soprattutto, della loro distribuzione rispetto alle aree stabili, tale co-registrazione può essere attuata a priori (cioè i modelli 3D sono definiti nello stesso sistema di riferimento al momento in cui sono generati) o a posteriori. Nel panorama attuale del telerilevamento, terrestre o da piattaforma aerea, gli approcci più diffusi e di semplice utilizzo che garantiscono una ricostruzione di dettaglio e precisione delle superfici fisiche sono senza dubbio rappresentati da laser scanning e fotogrammetria digitale. Si tratta di due tecniche di rilievo notevolmente diverse che consentono di ottenere un risultato del tutto simile in forma e contenuto, ossia una nuvola di punti. Una nuvola di punti è un insieme denso di coordinate di punti appartenenti alla superficie rilevata, generalmente corredati da una informazione di colore (a uno o tre canali) utile a discriminare gli elementi osservati. Nel caso del *laser scanning terrestre* (TLS), si tratta tipicamente di un unico canale radiometrico in toni di grigio, eventualmente anche rappresentabile con falsi colori previa la scelta di una specifica tavolozza, che rappresenta la riflettività degli elementi illuminati dal fascio laser. Nel caso della fotogrammetria, il dato radiometrico consta di tre canali RGB (o equivalenti), conformi alla colorazione naturale degli elementi. TLS e fotogrammetria sono argomenti già ampiamente trattati e conosciuti ed in lavori precedenti si è mostrato come, integrando le due tecniche, sia possibile eseguire valutazioni interessanti su precisione, risoluzione e affidabilità delle nuvole di punti fotogrammetriche [Pesci e Teza, 2016; Pesci et al., 2016; 2017; 2018a; 2018b; 2019].

Negli ultimi vent'anni si è assistito ad un rincorrersi delle due tecniche quanto a prestazioni e facilità di rilievo; se il TLS sembrava aver soppiantato la fotogrammetria a metà anni 2000, gli sviluppi successivi hanno sparigliato le carte. Oggi la fotogrammetria digitale *Structure-from-Motion* (SfM) si avvale di software specifici per il trattamento delle immagini tali da rendere l'approccio fotogrammetrico estremamente accessibile ad una ampia platea di operatori grazie all'implementazione di algoritmi automatici per la fase di orientamento delle immagini. In questo senso, fatta salva la necessità di acquisire le immagini in modo opportuno durante le campagne di misura (alta ridondanza, buona esposizione delle immagini, qualità delle camere, idonei punti di osservazione, ecc.), il trattamento dei dati è semplice e soprattutto non richiede l'utilizzo di dati esterni quali, per esempio, la conoscenza a priori della posizione delle fotocamere al momento dello scatto e le coordinate di punti appartenenti a reti di appoggio. Non vanno inoltre trascurati i grandi progressi delle piattaforme di osservazione aeree: al giorno d'oggi sono disponibili droni di costo relativamente basso dotati di piattaforma inerziale, cosa neppure prevedibile 15 anni fa. In ogni caso, TLS e SfM sono state entrambe caratterizzate da importanti evoluzioni negli ultimi anni, che continuano tuttora, e vanno viste non tanto come tecniche alternative, quando complementari [Teza et al., 2016].

Le immagini fornite da una fotocamera digitale contengono i metadati, cioè informazioni accessorie che possono essere utilizzate nella modellazione fotogrammetrica (modello della fotocamera, risoluzione spaziale, distanza focale, ecc.) e tra le quali, talvolta, possono trovarsi anche informazioni di geolocalizzazione cioè posizioni approssimative fornite da un ricevitore GNSS integrato nella fotocamera o nel sistema a cui la fotocamera è collegata al momento dello scatto. Se le immagini non contengono alcun dato di posizione e vengono processate senza vincoli, quali per esempio le coordinate di bersagli o elementi naturali visibili nelle stesse, la nuvola di punti risultante verrà fornita in un sistema di riferimento arbitrario ed in una scala non reale (ossia la nuvola non sarà metrica) e sarà necessario effettuare una correzione per ottenere una nuvola di punti metrica. Questa operazione di correzione è necessaria anche qualora sia disponibile il dato del ricevitore integrato poiché non caratterizzato da elevate precisioni (si parla di errori relativi che possono raggiungere valori dell'ordine del metro, riducibili tuttavia ad alcuni centimetri in caso di utilizzo di tecniche PPK (post-processed kinematic) GNSS).

In lavori precedenti abbiamo discusso un metodo comodo, semplice e intuitivo per scalare le

nuvole di punti grazie alla creazione di polilinee ottenute congiungendo punti omologhi a disegnare un contorno piuttosto ampio dell'area complessiva rilevata [Pesci et al., 2016; 2020]. Le nuvole di punti SfM sono generalmente ben confrontabili perché, se i rilievi sono stati correttamente progettati e condotti, esse godono di caratteristiche molto simili in termini di risoluzione e colore, fattori che permettono di operare trasformazioni di scala molto accurate grazie alla grande quantità di elementi omologhi identificabili e misurabili sulle stesse. Operazione semplice in quanto semplice è individuare elementi geometrici (come rocce, sassi, fratture, ecc.) ed anche elementi radiometrici (macchie, striature, discontinuità, ecc.). Si ottengono così nuvole di punti co-registrate, anche se non ancora dotate di fattore di scala tale da renderle metriche. Successivamente sarà poi necessario fornire una correzione generale di scala alle nuvole di punti co-registrate, ma non ancora metriche, al fine di ottenere nuvole di punti metriche. In questo modo non viene compromessa la precisione interna al momento dei confronti tra nuvole di punti poiché la trasformazione finale è la stessa. Inoltre, il processo è facilmente automatizzabile non appena eseguito per la prima nuvola di punti. Il criterio è lo stesso utilizzato per l'analisi di reti di monitoraggio locali GNSS in cui si calcolano con precisioni millimetriche le coordinate delle stazioni e poi, successivamente, il *cluster* viene inserito in un sistema di riferimento esterno portandosi dietro un errore comune più grande. Ovviamente, è possibile trasformare in metrica la prima nuvola di punti e allineare le altre ad essa, anche se ciò potrebbe rendere leggermente più complessa la fase di co-registrazione. È invece sconsigliato rendere metriche separatamente le varie nuvole di punti procedendo individualmente perché ciò darebbe luogo ad incertezze maggiori. Come evidenziato in Pesci et al (2020), nel caso di un sistema sostanzialmente planare in cui non ci sia una direzione sbilanciata in termini di lunghezza i modelli 3D ottenuti mediante SfM non mostrano distorsioni apprezzabili indotte dall'assenza di vincoli nel Bundle Adjustment (BA). Esempi di sistemi in cui ciò avviene (in cui quindi i vincoli nel BA sono indispensabili) sono il bacino di una colata detritica o una catena montuosa, che hanno una direzione nettamente prevalente,

Come già accennato in precedenza, per scalare una nuvola di punti è necessario disporre di un riferimento metrico che, tipicamente, è composto da un insieme di punti individuabili con precisione sulle nuvole di punti. È tuttavia necessario valutare il modo in cui le posizioni di tali punti sono state misurate, dunque con quali errori statistici e con quali eventuali errori sistematici, sia per il riferimento esterno sia per quello interno. Poiché non è pensabile di poter ottenere una nuvola di punti non affetta da errore di scala, è importante valutare l'entità di tale errore e che impatto questo errore può avere nello studio di lunghezze, volumi e variazioni superficiali.

In questo rapporto tecnico mostriamo e valutiamo le differenze di scala ottenute utilizzando alcuni target visibili sulla nuvola di punti SfM e misurati mediante navigazione satellitare cinematica in tempo reale (RTK GNSS) o, invece, riconosciuti ed estratti da una nuvola di punti fornita da un rilievo TLS mediante la creazione e ispezione di mappe morfologiche.

1. Nuvole di punti e misure

L'area studiata è un campo agricolo (80x40 m²) in località Bondeno, nei dintorni di Ferrara, in cui si è svolto l'esperimento *blast test* per lo studio della liquefazione indotta (Figura 1). Dal punto di vista del telerilevamento sono state ottenute nuvole di punti mediante rilievi con TLS e con SfM da drone. Non si fornisce qui alcuna informazione sul *blast test*, del resto non necessaria ai fini del presente Rapporto Tecnico. Il lettore interessato può trovare una descrizione esauriente dell'esperimento, incluse le valutazioni di ordine geotecnico, in Amoroso et al. [2020].

Le scansioni TLS sono state acquisite con uno strumento Optech ILRIS-3D da una altezza di circa 6 m rispetto al livello del campo osservato grazie ad un apposito supporto fissato sul tetto di un automezzo (<https://www.scan-go.eu/en>); inoltre, era stata valutata in precedenza l'assenza di

possibili effetti sistematici dovuti ad angolo di incidenza non ottimale. Il dato TLS è intrinsecamente metrico perché il sistema, che è attivo, conosce gli angoli di scansione, cioè la direzione di invio del fascio laser, e misura il tempo di volo degli impulsi ottenendo così la distanza sensore-oggetto con una precisione di alcuni millimetri. Dalle coordinate polari (distanza e angoli), forniti in un sistema di riferimento relativo, si ottengono le coordinate cartesiane dei punti illuminati dal fascio laser, da cui una nuvola di punti metrica. Le ispezioni delle nuvole di punti (sia da TLS, sia da SfM) e tutte le attività inerenti alla co-registrazione delle stesse e al calcolo dei fattori di scala sono stati eseguiti utilizzando il pacchetto software Innovmetric PolyWorks.

I rilievi SfM sono stati eseguiti utilizzando un drone che ha volato ad una altezza di circa 20-25 m secondo uno schema di volo in direzioni parallele e versi opposti in passaggi successivi, acquisendo 60-70 immagini sovrapposte nei due versi di volo. La dimensione del pixel a terra (*Ground Sampling Distance, GSD*), che è una misura della risoluzione della singola immagine, è di circa 5 mm e ciò, in prima analisi, comporta una risoluzione della nuvola di punti di circa 2 cm [Pesci et al., 2020]. La modellazione fotogrammetrica è stata eseguita utilizzando il pacchetto software Agisoft Metashape.

Sul campo, in zona vertici dell'area, sono stati collocati dei bersagli a forma di croce il cui centro è stato misurato con RTK GNSS (Figura 1). L'asta su cui è stata fissato il ricevitore GNSS aveva una altezza di circa 2 m ed è stata mantenuta manualmente in posizione verticale durante il tempo di acquisizione con l'ausilio di una bolla. Le misure RTK GNSS sono caratterizzate da precisioni di alcuni centimetri e, cosa non trascurabile, va considerato anche un errore di posizionamento dell'antenna che potrebbe determinare un offset anche superiore ad 1 cm nelle rapide operazioni di occupazione del punto e successivi spostamenti sugli altri target. Si ritiene quindi credibile un errore compreso tra 2 cm e 4 cm sulle coordinate dei punti misurati.

La risoluzione del rilievo SfM permette di osservare i target ma, ad una attenta ispezione, si nota che la geometria di questi oggetti non è correttamente restituita. Essi risultano infatti come "spalmati" sulla superficie sottostante. Ciò accade a causa della proporzione tra risoluzione SfM (nel caso specifico) e spessore degli elementi che formano il target (due bracci di 2 cm di larghezza e 20 cm di lunghezza). Risulta quindi evidente che, oltre all'errore di misura del centro del target c'è anche un errore di identificazione dello stesso sulla nuvola di punti, che potrebbe variare fino a 2 cm.

In merito alle nuvole TLS va sottolineato che il basso angolo di incidenza non ha permesso di identificare i target presenti sul campo mediante uno studio di intensità del segnale e, tantomeno, mediante una ispezione geometrica. A causa della geometria del rilievo, infatti, questi elementi "piatti" sono scomparsi nel rumore della misura. Per questi motivi si è ricorso ad una scelta di punti omologhi mediante una ispezione delle nuvole di punti TLS e SfM con l'ausilio di mappe a falsi colori idonee a mettere in evidenza la morfologia del terreno.

Figura 1 Sito della sperimentazione (Bondeno, FE).

Figure 1 Experimental field (Bondeno, FE, Italy).



2. Valutazione del fattore di scala da misure GNSS

Il calcolo è stato realizzato col metodo delle polilinee a congiungere i punti P1, P2, P3 e P4 che rappresentano i centri dei target. Le lunghezze considerate sono state calcolate come la somma delle distanze P1-P2, P2-P3, P3-P4, P4-P1, P1-P3 e P2-P4 (Figura 2). Il rapporto tra la somma delle lunghezze da misure GNSS e dalla nuvola di punti SfM ha permesso di calcolare una differenza di scala (e quindi un fattore correttivo da applicare) di 0.36%. Questo valore indica che la nuvola di punti originale SfM, ottenuta utilizzando immagini geolocalizzate con il sistema di posizionamento integrato nel drone, su una lunghezza di 100 m, presenta un errore complessivo di 36 cm. Nella figura si mostra la fase di selezione delle polilinee con i set di dati a disposizione.

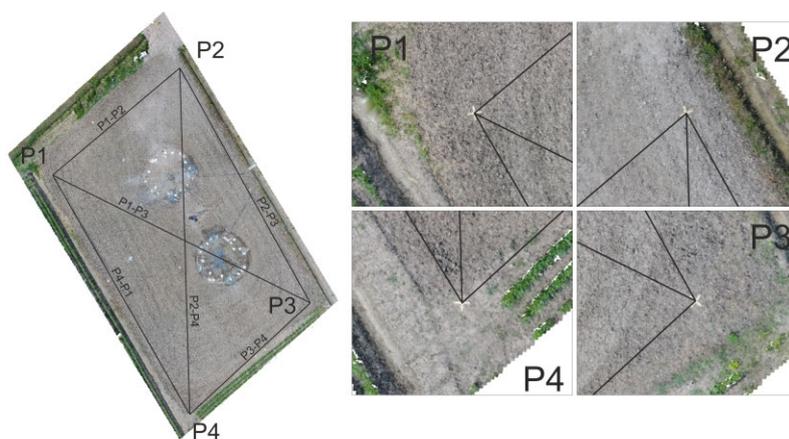


Figura 2 Metodo delle polilinee. L'area rilevata mediante SfM ed i quattro punti che corrispondono al centro dei target. Sono rappresentate le sei polilinee che congiungono i punti (perimetro e diagonali). A destra le aree ingrandite in cui è possibile riconoscere i target artificiali (croci di legno).

Figure 2 Polyline method for scaling. Observed area from SfM and homologous points from target centres. Point to point distances provide a reference length to be compared with GNSS one.

3. Valutazione del fattore di scala da nuvole di punti TLS

Per estrarre i punti omologhi necessari al calcolo del fattore di scala con l'utilizzo di nuvole di punti TLS, nella impossibilità di sfruttare le informazioni radiometriche per riconoscere immediatamente i target (particolari che risaltano bene in un'immagine a colori, e dunque in una nuvola di punti SfM, possono essere quasi invisibili in una nuvola di punti TLS in cui il dato radiometrico è una mappa di intensità, e viceversa), si è deciso di procedere in modo del tutto diverso. I punti omologhi sono stati definiti in base alle caratteristiche morfologiche delle nuvole di punti SfM e TLS. Le mappe morfologiche (Figura 3) si possono ottenere in vari modi e servono per mettere in evidenza le caratteristiche delle superfici rilevate. Nel caso specifico sono state ottenute in maniera indipendente dai due data set mediante l'interpolazione di un piano ed il calcolo successivo delle distanze punto-piano. Trattandosi di elaborazioni di nuvole di punti con caratteristiche diverse di densità e distribuzione è evidente che le mappe non possono essere perfettamente coincidenti; tuttavia, ciò che interessa all'operatore è la possibilità di mettere in evidenza punti omologhi (o supposti tali) a partire dalle distribuzioni delle distanze.

In sostanza si tratta non di ispezionare nuvole di punti con colori naturali (intensità del caso di TLS), ma di valutare invece le distribuzioni dei colori risultanti dalle mappe morfologiche o, per essere

più precisi, le distribuzioni delle sfumature delle variazioni di colore. Per ottimizzare il processo sono stati fittati quattro piani per ogni nuvola di punti, ognuno rappresentativo delle zone di angolo del campo. Successivamente sono stati calcolati, in quelle aree, le distanze punto-piano producendo singole mappe morfologiche, rappresentate nelle Figure 4 e 5 per TLS e SfM rispettivamente. Dalle ispezioni delle mappe sono stati estratti i punti omologhi, poi utilizzati come se fossero target naturali nella creazione delle polilinee e nella conseguente valutazione del fattore di scala (Figura 6). In questo caso il valore risulta essere 0.40%, a significare che la nuvola di punti SfM con fattore di scala stabilito con misure GNSS rozze fornite da ricevitore integrato nel drone sbaglia di circa 40 cm su una lunghezza di 100 m.

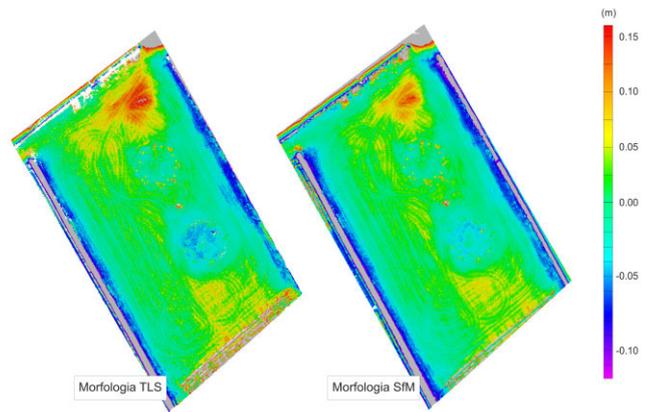
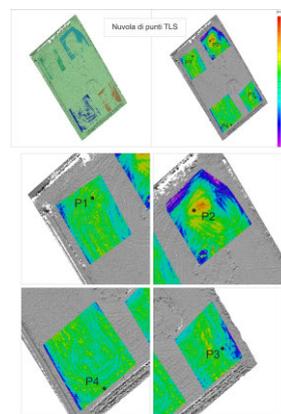


Figura 3 Mappe morfologiche da TLS e SfM, ottenute plottando il valore della distanza punto-piano in cui il piano di riferimento rappresenta la totalità dei punti. Le differenze sono attese perché i piani non sono gli stessi; esse sono tuttavia utili per identificare gli elementi (come si trattasse di immagini della stessa superficie ma visualizzate con contrasti e colori diversi).

Figure 3 TLS and SfM morphological maps represent point to plane distances. The reference plane is (in this case) the one best fitting data. Note: the search is to detect colour variations putting in evidence terrain elements as well as radiometric information and TLS and SfM fitting planes are not supposed to be the same.

Figura 4 Piani interpolati in quattro aree della nuvola di punti TLS e relative mappe morfologiche con identificazione dei punti da utilizzare come omologhi (si veda anche Figura 5).

Figure 4 Here, four fitted planes are used to provide local morphology, in the search for homologous points.



Riassumendo, sono state applicate due procedure indipendenti per ottenere il fattore di scala necessario a rendere metrica la nuvola di punti SfM. L'uso di target misurati mediante GNSS RTK e riconosciuti sulla nuvola di punti porta ad una correzione di 0.36%. L'uso di punti omologhi estratti da una analisi morfologica delle nuvole di punti SfM e TLS fornisce una correzione di 0.40%. I dettagli dei calcoli sono riportati in Tabella 1.

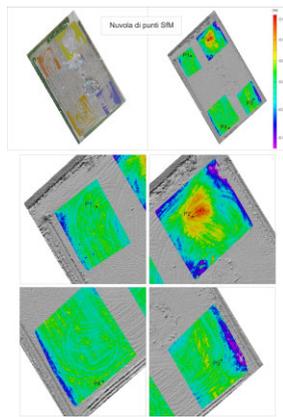


Figura 5 Piani interpolati in quattro aree della nuvola di punti SfM e relative mappe morfologiche con identificazione dei punti da utilizzare come omologhi (in analogia a Figura 4).

Figure 5 As in figure 4, the four fitted planes from TLS point cloud to obtain morphological maps searching for homologous points.

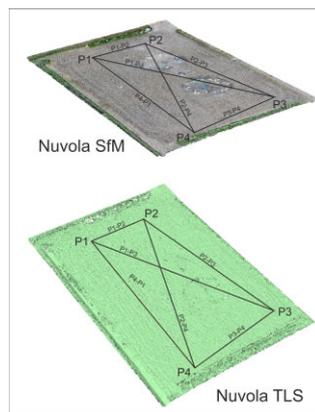


Figura 6 Polilinee estratte dalle nuvole TLS e SfM.

Figure 6 Extracted polylines from homologous points in TLS and SfM point clouds.

Polilinee	GNSS ^b (m)	SfM (m)	TLS (m)	SfM (m)
(lati poligono)	err 0.02-0.04 m	err 0.02-0.03 m	err 0.01-0.02 m	err 0.02-0.03 m
1-2	34.70	34.51	15.93	15.88
2-3	56.04	55.78	50.04	49.80
3-4	33.70	33.71	25.33	25.30
1-3	57.18	56.96	54.40	54.17
2-4	59.43	59.18	51.64	51.37
Somma lati	313.28	312.10	257.32	256.28
Scala GNSS ^a -SfM	0.36%		0.40%	

^a misure GNSS approssimative da ricevitore integrato nel drone;
^b misure GNSS RTK. Per la stima degli errori si rimanda al Capitolo 1.

Tabella 1 Calcolo dei fattori di scala utilizzando la distanza tra i punti individuati mediante target misurati con GNSS e con uno studio delle morfologie TLS e SfM.

Table 1 Scale factors from lengths comparison. The data set is shown together with computations. In row 1 is provided a reference error for GNSS, SfM and TLS measurements. In row 4 the scale factors show a discrepancy of 0.04%.

La discrepanza tra le due correzioni è dell'ordine dello 0.04%, ossia 4 cm su una distanza di 100 m. Questo risultato non rappresenta una verità assoluta esportabile ad ogni tipologia di rilievo; al contrario, esso è circoscritto a questa esperienza. Tuttavia, ciò induce una riflessione su possibili problematiche connesse al confronto tra modelli fotogrammetrici ottenuti con criteri differenti.

È importante sottolineare che una percentuale di errore di questo tipo è circa 10 volte superiore alla precisione di scala relativa che è facile dimostrare essere $0.00i\%$, con i variabile tra 1 e 4 nelle esperienze realizzate in precedenza su vari casi di studio (Pesci et al., 2019).

Si sottolinea che le co-registrazioni delle nuvole di punti sono sempre state eseguite mediante algoritmi di *surface matching* iterativo applicati alle aree note come non deformate. Nel caso specifico era noto a priori che le deformazioni significative erano localizzate nelle aree interessate dall'esplosione, da cui la possibilità di allineare le scansioni limitandosi alle aree che le circondano. In generale, è indispensabile individuare preventivamente le aree stabili (nei limiti della precisione dei rilievi).

4. Considerazioni finali

È difficile comprendere quale misura di riferimento, TLS o GNSS RTK, sia la migliore per il calcolo del fattore di scala, data la discrepanza dello 0.04% osservata.

Il dato TLS è estremamente affidabile e caratterizzato, per la singola scansione come nel caso in esame, da una precisione sub-centimetrica; si tratta dunque di un dato utile ai fini dell'estrazione delle coordinate necessarie per attribuire il fattore di scala al dato SfM, anche se potrebbe sussistere un errore legato alla scelta e identificazione dei punti omologhi. Il dato GNSS acquisito in modalità rapida o cinematica è meno preciso specie se ottenuto da brevi sessioni di misura (qualche minuto), oltre a possibili errori nel posizionamento dell'antenna. In sostanza, esistono un errore intrinseco legato al metodo utilizzato ed un errore "umano" che non è possibile eliminare completamente con le procedure utilizzate. È quindi importante sapere che l'errore di scala legato alla trasformazione introdotta per rendere metriche le nuvole di punti SfM non può essere sottovalutato nel caso in cui l'obiettivo dello studio sia stimare le variazioni superficiali, soprattutto quando utilizzate per la stima di volumi o di variazioni morfologiche macroscopiche [Pesci et al., 2018a].

Va anche sottolineato che, qualora il set di nuvole di punti SfM sia ottenuto con modalità molto simili e quindi sia caratterizzato da simili precisioni e dati radiometrici, cioè simili condizioni di osservazione e illuminazione, la precisione dell'allineamento migliora di un ordine di grandezza. Questo grazie alla facilità di scegliere punti omologhi riducendo al massimo l'errore di identificazione e selezione. Nell'ottica di un monitoraggio mediante confronto di modelli multi-temporali è quindi sempre essenziale garantire il minimo errore di scala interno. Tutto il set di nuvole di punti potrà poi essere corretto al fine di fornire una metrica consistente con la realtà. Le misure di supporto, quindi, devono essere valutate al fine di ridurre l'errore di scala pur con la consapevolezza che modelli ottenuti con metodi e criteri differenti andrebbero ispezionati e controllati prima di effettuare un confronto diretto in modo da scongiurare la possibilità di ottenere risultati "falsati". Nell'esempio riportato in questo lavoro il significato di una metrica imprecisa al 0.04% implica possibili e prevedibili effetti di errata interpretazione dei dati, come illustrato in figura 7. Per mettere in evidenza gli effetti sistematici causati dalla differenza di scala le nuvole di punti SfM sono state allineate sia per mediare gli scostamenti, utilizzando tutta l'area di sovrapposizione, sia per evidenziare gli stessi con l'uso del solo 20% dell'area comune, accentuando le discrepanze.

In conclusione, mentre il dato TLS è metrico, il dato fotogrammetrico richiede alcuni passaggi che potrebbero alterare le misure ed è necessario valutare in maniera scrupolosa possibili effetti sistematici causati da discrepanze di scala, anche se piccole.

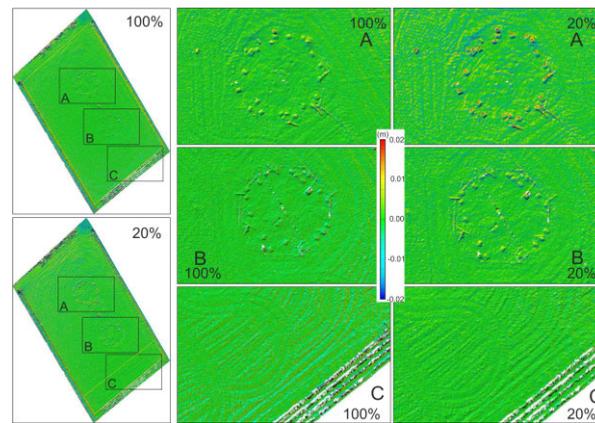


Figura 7 Effetto di un errore di scala pari a 0.04%. A sinistra le due nuvole di punti con scale differenti (correzione 0.36% e 0.40%) sono allineate utilizzando tutta l'area comune o solo una parte (circa 20%) come indicato dalla linea gialla tratteggiata. A destra le differenze nei due casi.

Figure 7 The effects due to scale factors differing at 0.04% level. On the left: point clouds, each one previously corrected with its relative scale factor (0.36% or 0.40%), aligned using the whole data set (100%) or a smaller area (20%). Note a yellow line to evidence overlapping used areas. On the right: A, B and C panels zoomed in.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Sara Amoroso per l'invito a partecipare agli esperimenti di *blasting* che hanno permesso di acquisire i dati utilizzati in questo lavoro; Fawzi Doumaz e Andrea Carpena per il contributo fondamentale nella fase di pilotaggio del drone ed acquisizione delle immagini; Massimo Fabris e Michele Monego per il riprocessamento dati mediante Metashape; Dario Conforti, Donato Marcantonio e Massimo Secchia per il contributo nel rilievo TLS. Infine, un grazie a tutto lo staff che ha partecipato alle misure topografiche GNSS.

Bibliografia

- Amoroso S., Rollins K.M., Andersen P., Gottardi G., Tonni L., García Martínez M.F., Wissmann K., Minarelli L., Comina C., Fontana D., De Martini P.M., Monaco P., Pesci A., Sapia V., Vassallo M., Anzidei M., Carpena A., Cinti F., Civico R., Coco I., Conforti D., Doumaz F., Giannattasio F., Di Giulio G., Foti S., Loddo F., Lugli S., Manuel M.R., Marchetti D., Mariotti M., Materni V., Metcalfe B., Milana G., Pantosti D., Pesce A., Salocchi A.C., Smedile A., Stefani M., Tarabusi G., Teza G., (2020). *Blast-induced liquefaction in silty sands for full-scale testing of ground improvement methods: Insights from a multidisciplinary study*. Engineering Geology, 265, 105437, 1-17, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105437.
- Pesci A., Teza G., Kastelic V., Carafa M.M.C., (2020). *Resolution and precision of fast, long range terrestrial photogrammetric surveying aimed at detecting slope changes*. Journal of Surveying Engineering, 146(4), 04020017-1-13, doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000328.
- Pesci A., Teza G., Loddo F., (2019). *Low cost Structure-from-Motion-based fast surveying of a rock cliff: precision and reliability assessment*. Quad. Geofis., 156: 1-22, doi:10.13127/qdg/156.
- Pesci A., Amoroso S., Teza G., Minarelli L., (2018a). *Characterisation of soil deformation due to blast-induced liquefaction by UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning*. International Journal of Remote Sensing, 39(22), 8317-8336, doi:10.1080/01431161.2018.1484960.

- Pesci A., Kastelic V., Teza G., Carafa M., Burrato P., Basili R., (2018b). *Utilizzo della fotogrammetria SfM terrestre per il monitoraggio dei versanti: considerazioni sulle precisioni per applicazioni a lunga distanza*. Rapporto tecnico INGV 394, 20 pp.
- Pesci A., Teza, G., (2016). *Precisione della nuvola di punti SfM: considerazioni e test*. Rapporto tecnico INGV 339, 17 pp.
- Pesci A., Teza G., Bacchetti M., Piroddi G., Rocchi B., (2017). *Fase preliminare di un esperimento per valutare la risoluzione dei modelli SfM*. Rapporto tecnico INGV 389, 20 pp.
- Pesci A., Teza G., Anzidei M., Vagni R., Carmisciano C., (2016). *Monitoraggio speditivo delle coste rocciose da fotogrammetria SfM da imbarcazione: considerazioni sul metodo per misure indipendenti*. Rapporto tecnico INGV 342, 19 pp.
- Pesci A., Teza G., Casula G., Loddo F., De Martino P., Dolce M., Obrizzo F., Pingue F., (2011). *Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: characterization of overall geometry and recognition of landslide events*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3), 327-336. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.12.002.
- Teza G., Pesci A., Ninfo A., (2016). *Morphological analysis for architectural applications: comparison between laser scanning and Structure-from-Motion photogrammetry*. Journal of Surveying Engineering, 142(3), doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000172, 04016004, 1-10.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

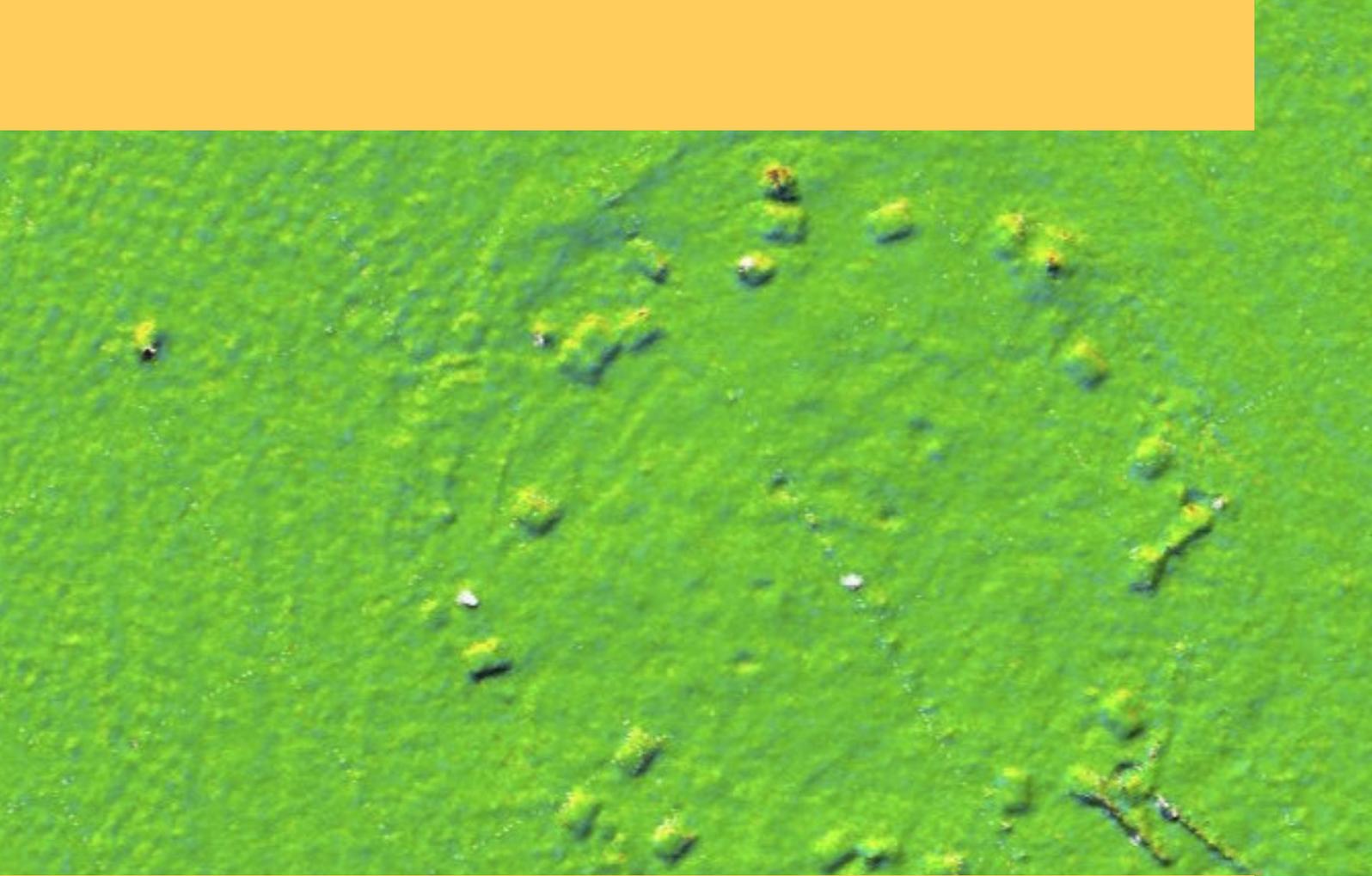
©2021

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA