

RILIEVO E MONITORAGGIO DI UNA CAVA DI MARMO CON TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE DA DRONE

MONITORING OF A MARBLE QUARRY WITH UAV PHOTOGRAMMETRY

P. Rossi^a

^a Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”, Via Pietro Vivarelli 10, 41125 Modena
paolo.rossi@unimore.it

PAROLE CHIAVE: Structure from Motion, cava di marmo, accuratezza metrica, monitoraggio, volumetrie

KEY WORDS: Strucure from Motion, marble quarry, metric accuracy, monitoring, volumes calculation

RIASSUNTO

La fotogrammetria da drone permette di eseguire rilievi in ambienti ostili, come le cave, garantendo operazioni veloci ed in condizioni di sicurezza, la creazione di prodotti dettagliati ed accurati che migliorano la gestione dell'attività estrattiva e consentono il monitoraggio dei quantitativi dei materiali cavati. Il caso analizzato è rappresentato da una cava di marmo del distretto di Carrara, un ambiente difficile da rilevare con tecniche tradizionali a causa delle sue dimensioni, caratteristiche morfologiche e specificità. In particolare, lo studio riguarda l'analisi dei dati multi temporali raccolti dopo rilevamento fotogrammetrico eseguito per scopi professionali ed esamina le strategie adottate oltre alle potenzialità di tale metodologia ed alle criticità emerse. Inoltre sono illustrati alcuni dei prodotti di maggiore utilità nel contesto ambientale del presente studio, ottenibili dopo ricostruzione tridimensionale: ortofoto, mappe, assetto dei pendii e dei fronti di scavo, linee di frattura, analisi di volume; in particolare sono state analizzate le variazioni volumetriche relative a due rilievi successivi.

ABSTRACT

UAV photogrammetry allows to survey hostile environments, such as quarries, fast and in safety conditions and to create detailed and accurate products that can improve the management of the activities and the monitoring of quarried materials. The case study is a marble quarry in the district of Carrara, this environment can be hardly surveyed with traditional techniques because of its size, morphological characteristics and specificity. The study focuses on the analysis of multitemporal data collected during a UAV flight performed for professional purposes, potentiality of the methodology, some strategies and critical issues are discussed too. Furthermore, some of the most useful products in the description of this environment are shown: orthophotos, maps, slopes, fracture lines, volume analysis and calculations.

1. INTRODUZIONE

Il distretto marmifero di Carrara è tra i più produttivi e famosi d'Europa, essendo costituito da numerose cave in cui sono estratti e movimentati i bianchi blocchi. Nella provincia di Massa-Carrara, nell'anno 2015, sono state escavati 3.4 milioni di ton di materiali di cui 922 mila in blocchi, il restante in sottoprodotti (scaglie bianche e scure, blocchi da scogliera). La provincia si posiziona al quarto posto nel panorama italiano per l'export di pietre tagliate, modellate e finite con il 18% del settore e un valore di 367 milioni di euro. Il settore lapideo conta circa 100 imprese e più di 4.000 addetti (il 10% del dato provinciale), generando circa 1,5 miliardi di fatturato e oltre 500 milioni di valore aggiunto corrispondenti al 13% del PIL della provincia di Massa-Carrara (Istituto di ricerche della Camera di Commercio di Massa-Carrara, 2016, Rapporto Economia Massa-Carrara; GEA, presentazione a Confindustria Verona 24-11-2016). La natura geologica, le tecnologie estrattive e gli automezzi in movimento lo rendono un luogo pericoloso per la sicurezza del personale addetto ai lavori; inoltre chi gestisce l'attività deve pianificare le estrazioni in congruenza alle normative vigenti e le concessioni rilasciate. L'attività estrattiva richiede rilievi veloci, ripetibili nel tempo e dati con accuratezze di alcuni centimetri che permettano di controllare il territorio, misurare e quantificare i repentini cambiamenti a cui è soggetto l'ambiente. Le tecniche di rilievo tradizionali (stazione totale, sistemi GNSS, laser scanner

terrestre, LIDAR, fotogrammetria da velivolo) forniscono utili informazioni per la gestione di cave in termini di valutazione dei rischi, pianificazione dell'area e valutazione dei quantitativi estratti; tuttavia richiedono elevati investimenti economici ed in termini di personale e logistici (Chen et al., 2015; Lingua et al., 2014). La fotogrammetria da drone è una tecnologia recente che ha avuto una grande diffusione negli ultimi anni grazie soprattutto al punto di presa privilegiato offerto dalla piattaforma SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) e allo sviluppo degli algoritmi di Structure from Motion (SfM). Risolve le esigenze dell'attività estrattiva garantendo un rilievo a costo contenuto, veloce, accurato e con poco personale in loco (Bui et al., 2017). La fotogrammetria da drone colma il gap tra i rilievi fotogrammetrici da velivolo e i metodi “terrestri” (Raeva et al., 2016) perché permette di effettuare riprese da distanza ravvicinata garantendo accuratezze metriche e risoluzioni di qualche centimetro anche in tali ambienti (Rossi et al., 2017). Le immagini acquisite da piattaforma SAPR con presa nadirale e obliqua sono processate tramite algoritmi di SfM per l'ottenimento di vari prodotti 3D e 2D, fra i quali nuvole di punti, mesh, modelli di elevazione della superficie e ortofoto rappresentanti la scena inquadrata. La ricostruzione di un ambiente di cava è una sfida anche per questa tecnologia “emergente” che promette buoni risultati a fronte di un rilievo non convenzionale e un processing semi automatico delle immagini. Le principali criticità riguardano le caratteristiche dell'area: pendenze elevate, cambi repentini nell'assetto delle

superfici, occlusioni, geometrie complesse, estensioni rilevanti, inaccessibilità dei luoghi e difficoltà nel posizionamento dei punti di vincolo. In questo studio è descritto il rilievo eseguito da un topografo professionista e pilota di droni. Il rilievo commissionatogli aveva lo scopo di generare prodotti 2D utili alla rappresentazione della cava (ortofoto e curve di livello) e di inquadrarli nella cartografia di riferimento al fine di verificare le parcellezioni catastali e le concessioni rilasciate. Gli scopi del lavoro e delle indagini presentate di seguito sono analizzare il rilievo effettuato e fornire un contributo ulteriore a professionisti e gestori di attività estrattive, mostrando le potenzialità di questa metodologia, i risultati ottenibili e gli sforzi necessari. Un rilievo da drone e una ricostruzione tridimensionale hanno un contenuto di informazione, sia metrica che fotorealistica, che va oltre i prodotti tradizionali che generalmente sono richiesti dal committente o proposti dal professionista.

In ambiente scientifico si sono moltiplicati i casi di rilievi da SAPR finalizzati a numerose indagini. La valutazione delle accuratèzze metriche ottenibili in relazione alle caratteristiche del volo, alla numerosità e distribuzione dei punti di vincolo (o Ground Control Points-GCPs) permette di progettare al meglio il rilievo riducendo gli sforzi in loco. Diversi autori (Harwin et al., 2015, Rosnell et al., 2012)

hanno analizzato le principali fonti di errore nel processo di ricostruzione 3D con SfM; altri si sono focalizzati sulla numerosità e distribuzione dei punti di vincolo, riconoscendovi la principale fonte di errori nell'accuratèzza dei prodotti SAPR-SfM (James et al., 2017; Rossi et al., 2017; Mancini et al., 2016; James e Robson, 2012).

La valutazione dei rischi legata al pericolo crolli e l'analisi di stabilitè è importante in ambienti in continua evoluzione a causa dell'attività estrattiva. Una ricostruzione tridimensionale ad elevata risoluzione con contenuto fotorealistico offre gli elementi necessari alla valutazione dell'assetto delle superfici di estrazione e l'identificazione delle superfici (Salvini et al., 2018; Mancini et al., 2017). Anche nella gestione della cava, i prodotti della fotogrammetria da drone possono fornire accurati elementi per la progettazione e la gestione degli scavi e l'ottimizzazione delle estrazioni al fine di ottenere il maggior numero di blocchi di qualità (Bugler et al., 2017; Yarahamadi et al., 2018). La valutazione dei volumi estratti è una necessitè per chi gestisce le attività estrattive in quanto deve interfacciarsi con concessioni e normative: modelli tridimensionali accurati ed ad elevata risoluzione permettono di effettuare queste stime (Xiang et al., 2018; Esposito et al., 2017; Raeva et al., 2016; Santise et al., 2014).

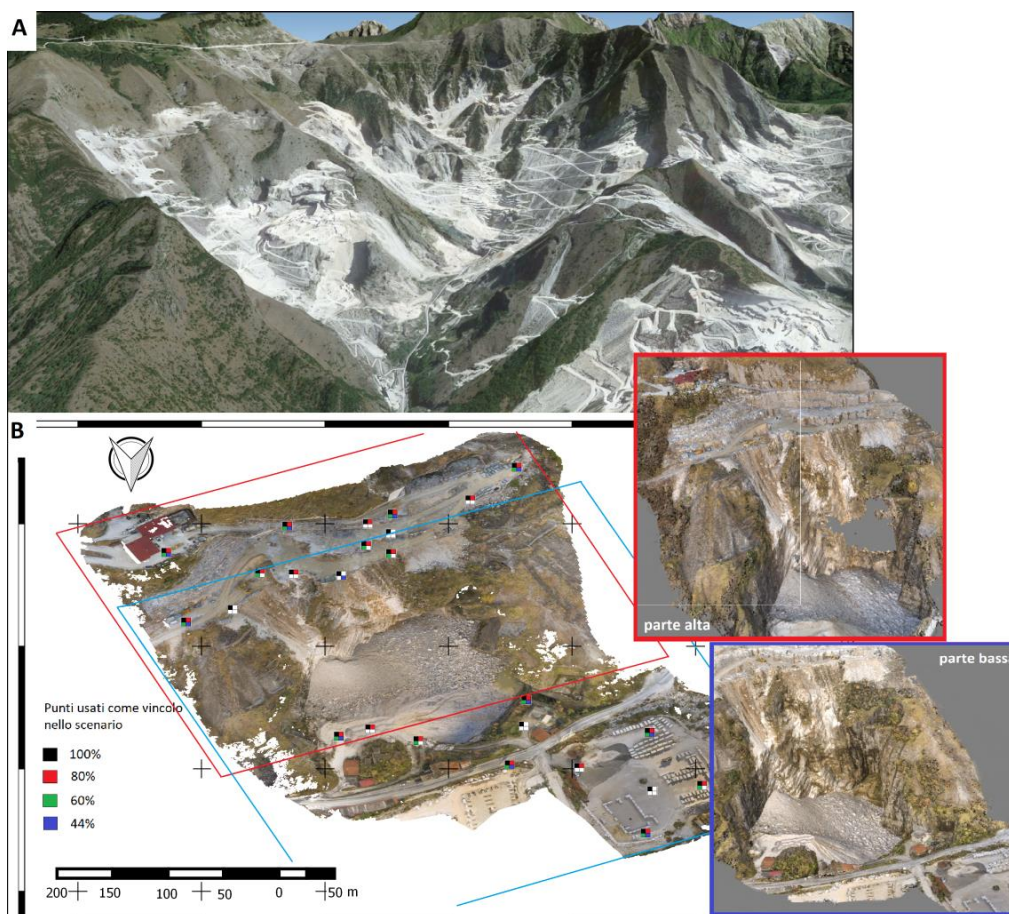


Figura 1. Area di studio. A) vista sulle cave di marmo nelle Alpi Apuane; B) ortofoto dell'area indagata con rappresentazione dei GCPs e loro utilizzo nei diversi scenari; identificazione di parte bassa, alta e zona in comune ai due rilievi.

2. METODOLOGIA

2.1 Caso di studio

La cava di marmo considerata in questo studio è localizzata nel bacino marmifero Apuano della provincia di Massa Carrara. Alle spalle del centro storico della città di Carrara si innalzano le Alpi apuane con i tre bacini marmiferi di Colonnata, Fantiscritti e Torano; da queste vallate e dalle loro cave da più di duemila anni viene estratto, trasportato, lavorato e commercializzato il marmo. Il materiale estratto è un'eccellenza italiana nel mondo e costituisce la principale attività produttiva dell'area di Carrara. L'area analizzata si inserisce in un contesto di intensa attività estrattiva caratterizzata da sentieri, strade che si snodano sui versanti, aree per lo stoccaggio del materiale e mezzi in movimento. Il territorio è caratterizzato da pendii scoscesi che terminano in valli strette, con aree destinate all'accumulo del materiale cavato e di risulta e pareti pseudo-verticali (Fig. 1A). La metodologia di coltivazione è legata alle condizioni morfologiche locali ed al tipo di materiale; generalmente sono cave di versante a gradoni, aperte in zone di pendio, che creano fronti di scavo diversificato e realizzano successivi terrazzamenti caratterizzati da alternanze di "alzate" pseudo-verticali di diversa altezza e "pedate" orizzontali. Il caso di studio (Fig. 1B) ha un'estensione di circa 400x400 m, un dislivello di circa 150 m e si compone di:

- piazzale per lo stoccaggio dei blocchi estratti nella zona di fondovalle (Fig. 1B in basso a destra);
- fossa di accumulo dei materiali detritici derivanti dall'attività (Fig. 1B zona centrale);
- zona di coltivazione ed estrazione (Fig. 1B zona in alto).

2.2 Volo e rilievo di appoggio

La piattaforma SAPR usata per il rilievo fotografico è il Phantom4 della DJI, un drone commerciale di 1.380 g di peso e 35 cm di diametro, equipaggiato con sensore GNSS e fotocamera 1/2,3" (6,17x4,55 mm) da 12 Mpixel. Per motivi logistici il rilievo è stato eseguito in due giornate tra i mesi di Novembre e Dicembre. La prima giornata ha interessato la parte bassa: piazzale, fossa accumulo materiali di risulta e parete sub verticale (Fig. 1B); la seconda, 10 giorni dopo, ha interessato le aree superiori di coltivazione della cava. Nelle due giornate sono stati eseguiti 6 voli in modalità manuale con assetto della camera nadirale ed obliquo (circa 45° di off-nadir) per un totale di 1.081 fotogrammi. La scelta dell'uso di prese nadirali ed oblique è necessaria data la conformazione del territorio (prevalente sviluppo verticale dell'area e coltivazione a gradoni) per garantire una geometria di acquisizione robusta, completezza della ricostruzione ed evitare occlusioni. Le quote di volo e la distanza dal terreno seguono la parete rocciosa per garantire simili dimensioni del pixel al suolo, in modo da ottenere una ricostruzione dell'area con lo stesso grado di dettaglio (circa 2 cm/pixel).

Nell'area sono stati installati 25 targets fotogrammetrici (scacchiera nero-gialla, 25 cm di lato) che costituiscono i punti di vincolo nel processo di ricostruzione fotogrammetrica. Le coordinate dei punti di vincolo sono state misurate con un ricevitore Geomax Zenith20 a doppia frequenza con modalità NRTK, in collegamento con le stazioni della rete ItalPoS; l'accuratezza sulle coordinate è di circa 5 cm. La numerosità, la densità e la distribuzione spaziale e l'accuratezza nel rilievo dei GCPs sono anch'essi fattori chiave nella creazione di prodotti metricamente accurati; molti autori (James e Roson, 2012; Harwin et al., 2015) hanno dimostrato che l'accuratezza nei DSMs migliora all'aumentare dei GCPs, anche in relazione ad

una buona distribuzione su tutto il perimetro dell'area di interesse. Gli stessi autori evidenziano che l'accuratezza di tali punti di vincolo influisce sulle caratteristiche metriche del risultato finale.

2.3 Creazione nuvola di punti

L'approccio Structure from Motion è stato utilizzato per la ricostruzione 3D dell'intero versante di cava e piazzale di stoccaggio. Questo approccio, come riportato ad esempio in Chen et al. (2015), applica algoritmi di identificazione automatica delle features e di bundle adjustment.

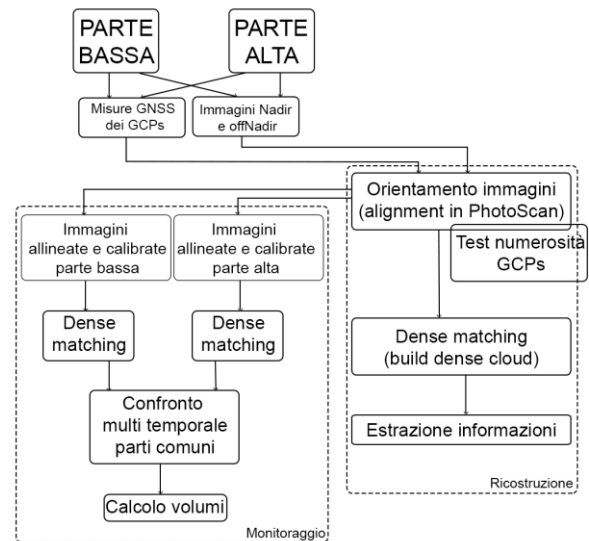


Figura 2. Workflow del processamento dati. A sinistra la fasi riconducibili al monitoraggio, a destra quelle relativa alla ricostruzione, con analisi sui GCPs ed estrazione informazioni.

Rilievo		
Immagini nadirali e oblique	totale	1.081
	parte bassa	494
	parte alta	586
Numero di GCPs	totale	25
	parte bassa	11
	parte alta	14
Accuratezza GCP	5 cm	
Processing with PhotoScan		
Orientamento delle immagini		
Accuratezza	alta	
Selezione delle coppie	generica	
Nuvola di punti densa		
Qualità	media	
Filtro sulla profondità	aggressivo	
Mesh e texture		
Tipo di superficie	heighfield	
Qualità	media	
Mappatura, modalità di fusione	generica, a mosaico	

Tabella 1. Caratteristiche del dataset e parametri di processing in PhotoScan.

Tutte le immagini acquisite durante il volo e i dati del rilievo a terra sono stati utilizzati per effettuare l'orientamento delle immagini: Il risultato della SfM è allora la ricostruzione delle

geometrie di presa e la contemporanea creazione della nuvola sparsa dei punti dell'oggetto, oltre al calcolo dei parametri di auto calibrazione della fotocamera. L'inserimento in questa fase dei punti di controllo rilevati con misure GNSS, permette di generare un prodotto scalato e georeferenziato. Inoltre, l'inserimento di vincoli al concatenamento delle immagini migliora la qualità metrica del prodotto finale riducendo le distorsioni del modello (Harwin et al., 2015, James e Robson, 2012).

Sono stati eseguiti alcuni test in fase di allineamento variando la numerosità dei GCPs (si veda Fig. 2, linea "ricostruzione"). In seguito, sul dataset con 25 GCPs, si sono applicati gli algoritmi di dense matching per creare la nuvola densa sulla base degli output della fase precedente (Rothermel e Haala, 2011). Nel caso di studio presentato, le elaborazioni sono state eseguite con il ben noto software Agisoft PhotoScan (v. 1.2.0, build 2127): in Tab. 1 sono riportati i parametri utilizzati e riassunte le caratteristiche del dataset. Un'ulteriore linea logica seguita durante il processing dei dati (indicata in Fig. 2 come "monitoraggio") pone l'attenzione sulla multi temporalità del rilievo eseguito, e sui dieci giorni intercorsi tra le acquisizioni di parte bassa ed alta. A termine della fase di allineamento complessivo di tutto il dataset, sono stati separati i dataset relativi ai due diversi giorni di acquisizione, le immagini già allineate e calibrate sono state utilizzate per costruire due nuvole dense distinte e relative alle due porzioni. Le due ricostruzioni hanno permesso di evidenziare alcuni cambiamenti nelle aree in comune e procedere con un'analisi multi temporale.

2.4 Test sulla numerosità dei GCPs

In questa analisi sono stati ipotizzati 4 scenari: tutti i 25 targets usati come GCP (scenario 100%) che è il riferimento e sarà utilizzato in tutte le analisi successive, 20 punti di vincolo (scenario 80%), 15 GCPs (scenario 60%), 11 punti di vincolo (scenario 44%). Il confronto degli errori sui punti di vincolo (GCPs) è indicatore della capacità degli algoritmi di bundle adjustment di risolvere il sistema di equazioni compensando le variabili inserite. Le valutazioni degli errori sui punti di controllo (CPs, ovvero quelli non usati come vincolo) forniscono informazioni sull'accuratezza metrica del prodotto generato. A queste valutazioni numeriche può essere utile affiancare confronti tra le nuvole di punti generate dai diversi scenari (confronti tra nuvole di punti) per valutare quali sono le zone che risentono maggiormente di un insufficiente numero di vincoli. Come mostrato in Fig. 1, il numero di vincoli è stato diminuito cercando di mantenere una distribuzione omogenea su tutta l'area e garantendo vincoli nelle zone perimetrali onde evitare distorsioni geometriche nella ricostruzione 3D (James e Robson, 2012).

2.5 Estrazione informazioni

Il dato tridimensionale generato dal processo fotogrammetrico ci offre informazioni sull'assetto dei fronti di estrazione, linee di frattura, geometrie di scavo, volumetrie. Si sono applicati alcuni algoritmi e strategie per ricavare queste informazioni ulteriori:

- Valutazione sugli assetti delle superfici; sono analisi interessanti per controllare il rispetto delle geometrie di estrazione, identificare aree a rischio crollo e discontinuità nelle pareti rocciose. Gli strumenti fotogrammetrici offrono come output nuvole di punti con informazioni su colore e normali. Si possono fare visualizzazioni in falso colore rappresentando il valore delle normali o applicare algoritmi per l'estrazione di patches planari dalla nuvola di punti. Il

software Cloud Compare (Lague et al., 2013) implementa il plugin *Facets* che permette di individuare e delimitare zone quasi piane all'interno di un modello tridimensionale (Dewez et al., 2016).

- Calcoli volumetrici; come spiegato approfonditamente nel paragrafo 2.6, è possibile calcolare il volume compreso tra due superfici, questo agevola la stima delle giacenze nelle aree di stoccaggio, le volumetrie da movimentare, le volumetrie cavate a fronte delle concessioni rilasciate.

2.6 Confronto multi temporale e analisi volumetriche

Nei dieci giorni intercorsi tra i rilievi della parte bassa ed alta l'attività estrattiva è proseguita generando cambiamenti nella zona di estrazione e stoccaggio del materiale di risulta, queste due zone sono infatti le uniche ad essere state inquadrate in entrambi i rilievi. Il confronto multitemporale è stato eseguito con l'algoritmo M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) implementato in Cloud Compare, approccio che permette di confrontare direttamente le nuvole di punti generate ad esempio in un processo fotogrammetrico, evidenziando le distanze significative rispetto alla rugosità o "rumorosità" della superficie. Le zone che evidenziano differenze significative sono state analizzate nel dettaglio per valutare se fossero legate ad errori in fase di ricostruzione del modello o all'attività estrattiva. Il calcolo delle volumetrie estratte/depositate è stato effettuato con l'algoritmo 2.5Volume di CloudCompare; questo approccio 2.5D si adatta al caso esaminato, la zona interessata viene suddivisa nel piano orizzontale secondo una griglia definita dall'utente, per ogni cella si calcola la differenza in elevazione tra le due superfici e il contributo al volume totale è dato dal volume di ogni singolo parallelepipedo calcolato. Per conoscere gli errori nella stima dei volumi, è stata effettuata una "prova in bianco" in una porzione dell'area comune ai due rilievi e non soggetta a cambiamenti; si tratta di una prova empirica, volta alla stima dell'eventuale residuo in volume e darà indicazione degli errori intrinseci alla procedura adottata.

3. RISULTATI

3.1 Ricostruzione tridimensionale

Il caso analizzato è molto difficile da rilevare e ricostruire a causa dell'estensione e delle geometrie complesse che lo caratterizzano. La modalità di esecuzione del rilievo a varie quote, seguendo la conformazione del territorio ed alternando prese nadirali ed oblique ha permesso di garantire un'elevata ridondanza di immagini (> 9), evitando occlusioni e garantendo una risoluzione a terra di circa 2 cm/pix. L'orientamento delle 1.081 immagini con PhotoScan ha richiesto circa 9 ore in modalità alta "accuratezza" (workstation CPU i7, 16 GB di RAM), altre 9 ore sono state impiegate nella creazione della nuvola densa in qualità media. La nuvola sparsa risultante è composta da 320.000 punti su un'area di 110.000 m² di estensione; la nuvola densa è composta da circa 50 milioni di punti con una densità di circa 450 punti/m². La fase di creazione della mesh e generazione della texture con qualità media ha richiesto poco più di un'ora. Il DSM creato ha una risoluzione di 8,5 cm/pix, l'ortofoto di 2,12 cm/pix.

L'esecuzione del rilievo di parte bassa ed alta ad epoche differenti permette l'identificazione dei cambiamenti avvenuti nelle porzioni comuni ai due rilievi. A tal fine, come descritto in Fig. 2, sono state generate due nuvole di punti dense distinte (porzione bassa e alta) utilizzando fotogrammi i cui orientamenti erano stati calcolati nell'elaborazione dell'intero dataset (1081 fotogrammi e 25 targets). Le nuvole dense risultanti hanno le seguenti caratteristiche:

- Parte bassa, 586 immagini, 29 milioni di punti, 1h 30’;
- Parte alta, 494 immagini, 25 milioni di punti, 2h 30’.

3.2 Valutazioni sulla numerosità dei GCPs

La metodologia proposta permette la creazione di alcuni scenari utilizzando i punti rilevati a terra come vincolo o come controllo nella fase di bundle adjustment. La posizione del punto derivante dal rilievo GNSS e la posizione corrispondente nella ricostruzione sono state utilizzate per valutare le accuratze ottenibili.

La Tab. 2 presenta i risultati dei 4 scenari in termini di errori medi calcolati su tutti i punti di vincolo e di controllo. Tutti e 4

gli scenari analizzati forniscono risultati soddisfacenti e coerenti con il rilievo effettuato. L'errore 3D sui punti di vincolo varia da 4 cm (scenario 100, 80, 60%) a circa 3 cm (scenario 44%); come prevedibile, sui punti di controllo aumenta al diminuire dei vincoli, dai 2,5 cm ai 5 cm, con 20 e 11 vincoli rispettivamente. In Fig. 3 è rappresentata la distanza calcolata tra le nuvole sparse di scenario 100% (presa come riferimento) e 44%: le due ricostruzioni praticamente si equivalgono (media 6 mm, st.dev. 30 mm), ma notiamo che ci sono porzioni in cui lo scostamento tra i due modelli è considerevole (± 30 cm), specialmente nelle aree perimetrali.

Scenario	GCPs					CPs				
	Num	Errore [cm]				Num	Errore [cm]			
		E(X)	E(Y)	E(Z)	E (3D)		E(X)	E(Y)	E(Z)	E (3D)
100%	25	1,3	2,0	2,9	3,8	0	-	-	-	-
80%	20	1,4	2,2	3,2	4,1	5	1,1	1,5	1,5	2,4
60%	15	1,5	2,2	3,3	4,3	10	1,2	1,9	2,6	3,4
44%	11	1,6	1,6	2,2	3,2	14	1,3	2,6	3,9	4,9

Tabella 2. Valutazione accuratze sui 4 scenari, errori sulle coordinate di GCPs e CPs espresse lungo direzione X, Y, Z e come distanza euclidea sulle tre dimensioni.

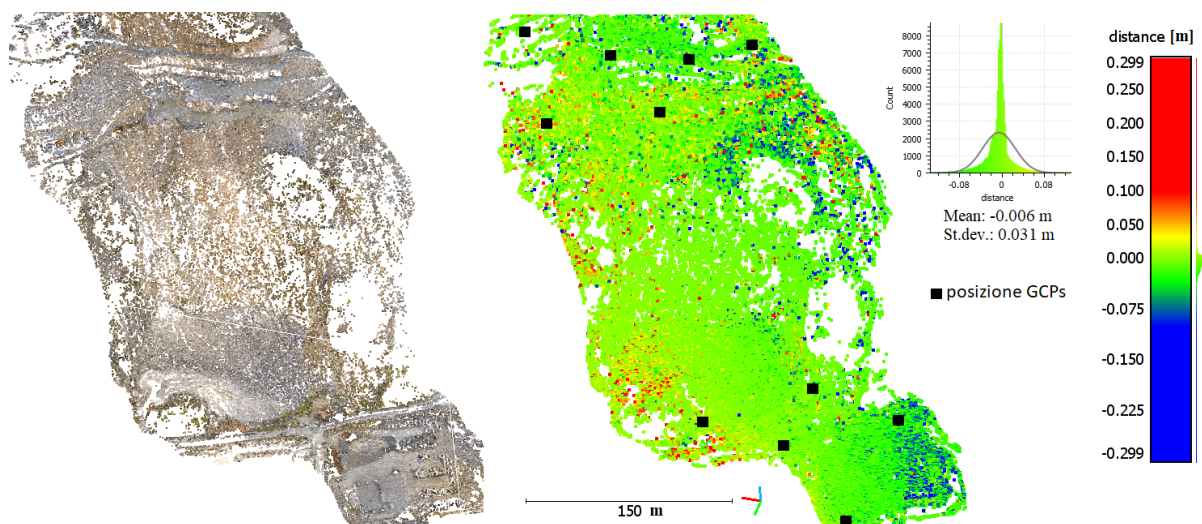


Figura 3. Distanza tra la nuvola di punti sparsa di riferimento e scenario al 44%.

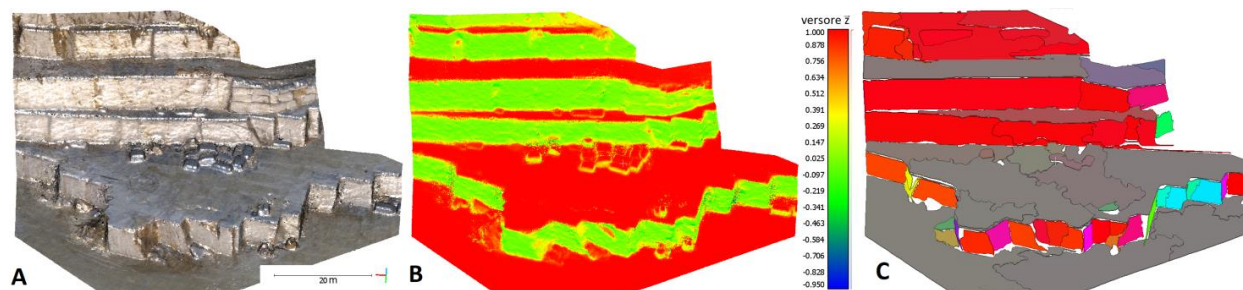


Figura 4. A) vista della zona di estrazione; B) rappresentazione in falso colore della normale lungo l'asse Z ai punti; C) identificazione di patches planari.

3.3 Estrazione informazioni

Il modello tridimensionale ottenuto dal rilievo effettuato fornisce informazioni metriche dettagliate ed accurate, il punto di vista privilegiato (vista dall'alto, assenza di ostacoli e vegetazione scarsa) garantisce la completezza della ricostruzione. In Fig. 4 sono riportate alcune informazioni che si possono evincere dalla nuvola di punti ricostruita: la Fig. 4A

rappresenta i valori della normale lungo l'asse Z (verticale). In Fig. 4B compaiono le patches estratte dalla nuvola di punti che permettono di identificare aree pressoché piane ed evidenziare le discontinuità tra esse. In Fig. 4A si riconoscono le pedate ed alzate, le superfici orizzontali sono in rosso, quelle verticali in verde. In Fig. 4B si nota che l'area indagata è approssimabile con patches planari e risaltano le discontinuità; inoltre la

colorazione diversa delle varie giaciture permette di gestire e controllare l'assetto dei diversi piani di scavo.

Al fine del computo dei volumi si è analizzata la sola area di stoccaggio blocchi nel fondovalle: la costruzione della mesh permette la creazione di una superficie bidimensionale che può essere utilizzata per calcolare volumetrie. Nel caso mostrato in Fig. 5B è stato calcolato il volume di materiale stoccato inteso come volume compreso tra le superfici ricostruite e il piano del piazzale (si veda la Fig. 5C). Il volume risultante, di circa 500 m³, è stato calcolato sfruttando un approccio 2.5D e comprende blocchi e traversine di appoggio.

3.4 Analisi multi temporale

L'analisi multi temporale è stata condotta sulle porzioni comuni ai rilievi effettuati nelle due diverse giornate e relativi alla parte bassa e parte alta (che verranno definiti anche "epoca 0" ed "epoca 1").

Una "prova in bianco" è stata effettuata per valutare gli errori nel calcolo dei volumi su una porzione della parete verticale tra la fossa e l'area di estrazione esterna alle regioni di scavo e accumulo: il residuo volumetrico computato è di circa 17 m³ su un'area di circa 1.400 m², quindi solo l'1,2%.

Nella Fig. 6 è raffigurata la zona di deposito dei materiali di scarto in cui, nell'arco temporale dei dieci giorni, sono avvenuti alcuni cambiamenti. In particolare (Fig. 6A e 6B) alcuni cumuli di pietrisco sono stati spostati dal piazzale verso la zona di accumulo e lungo i pendii del piazzale. In Fig. 6C questo spostamento è ben evidenziato dalle differenze tra i due modelli. Le aree blu corrispondono ad una perdita di volume, e quindi, di materiali, che sono stati spostati lungo il pendio del piazzale (aree rosse); i valori calcolati sono di 378 m³ rimossi (blu) e 366 m³ aggiunti (rosso).

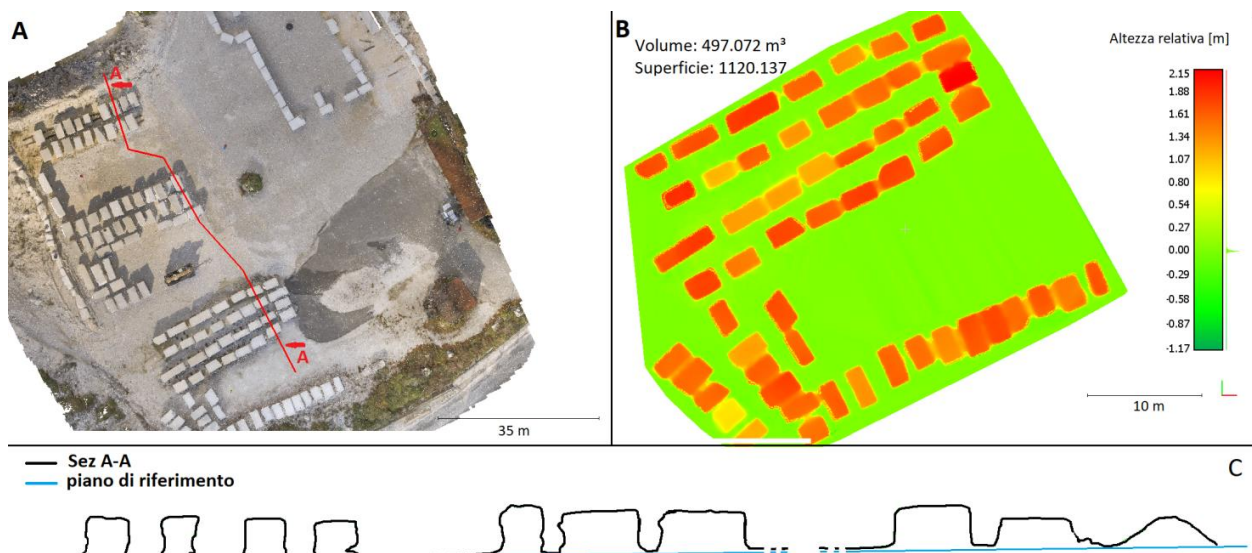


Figura 5. A) area del piazzale di stoccaggio; B) calcolo volume area selezionata; C) sez. AA.

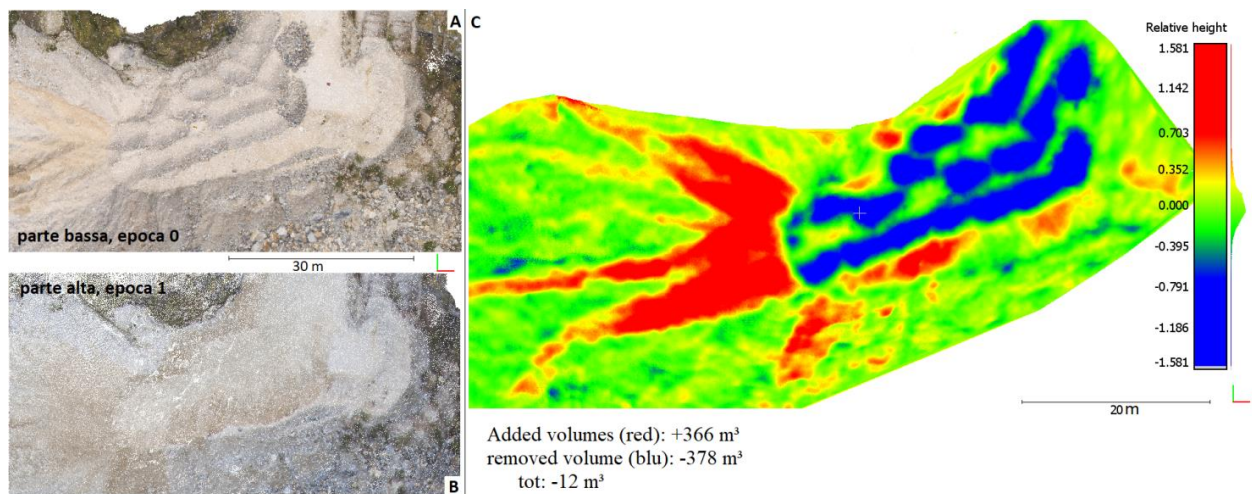


Figura 6. A, B) ortofoto dell'area nel primo e secondo rilievo; C) calcolo volumetrico tra le due superfici.

4. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

Si può innanzitutto affermare che la scelta di un drone non professionale come il Phantom4 di DJI non ha inficiato il risultato finale: è ormai appurato che anche mezzi commerciali

forniscono ottime prestazioni in termini di manovrabilità, stabilità e qualità delle immagini. La chiave per l'ottenimento di buoni risultati sta piuttosto nella progettazione del rilievo (quota di volo, densità immagini, geometrie di presa), tenendo conto delle caratteristiche della camera e dell'oggetto indagato.

L'acquisizione di immagini a quote di volo e assetto della camera variabili garantisce le migliori performances in fase di ricostruzione (James e Robson, 2014), ma può rendere difficoltosa la fase di orientamento delle immagini. PhotoScan è un software versatile e permette di gestire agevolmente datasets molto variegati, immagini a diversi orientamenti e bassa ridondanza. La quota di volo e assetto variabili hanno permesso di acquisire immagini dettagliate delle pareti orizzontali e verticali ed ottenere ortofoto con risoluzioni di circa 2 cm/pix. La distribuzione omogenea di punti di vincolo in tutta l'area di interesse, in particolare anche a diverse quote, riduce gli errori in fase di ricostruzione, ma comunque l'accuratezza nel rilievo delle coordinate dei GCPs determina l'accuratezza del prodotto 3D finale. L'analisi sulle accuratezze ottenibili al variare del numero di GCPs indica che:

- le quote sono soggette agli errori più alti, in quanto GNSS e fotogrammetria hanno generalmente incertezze più alte nella restituzione della terza dimensione;
- al diminuire dei punti di vincolo cala l'errore sui GCPs, il modello fotogrammetrico riesce ad adattarsi meglio ai vincoli;
- al diminuire dei vincoli aumenta l'errore sui CPs, poiché la riduzione dei vincoli causa distorsioni geometriche ed errori negli orientamenti delle immagini;
- il processing fotogrammetrico fornisce residui sui CPs che variano dai 2,5 ai 4,9 cm (Tab.2), tali risultati sono inferiori all'accuratezza del rilievo GNSS delle coordinate dei punti a terra (5 cm).

In termini numerici, i risultati di tutti gli scenari sono soddisfacenti per gli scopi del lavoro e coerenti con il rilievo effettuato. Lo scenario 44% ha un errore sui CPs pari a 4,9 cm. Dal confronto tra nuvole di punti generate con 25 e 11 punti di vincolo (Fig. 3) notiamo che sono confermati i valori dell'analisi sui CPs (la st.dev. è di pochi centimetri) ma alcune aree perimetrali presentano distorsioni rispetto al riferimento (scenario 100%) provocate dall'assenza di vincoli in tali zone.

Il modello 3D ottenuto con la metodologia proposta fonde accuratezza metrica, contenuto fotorealistico ed elevata risoluzione: tale ricchezza di informazioni viene oggi largamente finalizzata alla creazione di mappe, ortofoto, DSM e curve di livello. Questi prodotti sono esportabili direttamente dai software di SfM e permettono una visione complessiva dell'area, l'esecuzione di misure di estensione e quota. Se la cava è di grandi dimensioni, può essere utile usare tali prodotti per effettuare vettorializzazioni in software tipo GIS e definire i percorsi di transito, mappare le zone di estrazione, di stoccaggio, depositi di materiali, attrezzature, carburanti, aree di sosta. Queste informazioni possono rivelarsi assai utili in fase di gestione e pianificazione delle attività. L'elevato grado di dettaglio del modello 3D e le informazioni sulle normali ai punti permettono di estrarre valori sull'assetto dell'area. In Fig. 4B è raffigurata la componente Z della normale ai punti: questo tipo di visualizzazione permette l'identificazione di zone a pendenza negativa e quindi a maggior rischio di crollo. Si possono inoltre calcolare la pendenza dei pendii in cumuli di materiale sciolto e fornire elementi per le valutazioni di stabilità. Le patches planari estratte dal fronte di scavo (Fig.4C) sono utili nella definizione di discontinuità, fratture nella parete rocciosa e valutazioni di assetto dei fronti di scavo.

Il calcolo delle volumetrie (Fig. 5 e Fig. 6) è l'analisi che meglio sfrutta l'accuratezza metrica e la densità del dato così rilevato. Generalmente con le tecniche tradizionali (TS e GNSS) si misurano pochi punti che sono poi usati per definire approssimativamente la superficie reale, la pratica è onerosa e genera stime poco accurate; al contrario, i modelli 3D fotogrammetrici permettono analisi più veloci e dettagliate.

L'analisi multi temporale ha permesso di rilevare i cambiamenti avvenuti in un certo periodo di tempo (Fig. 6A e 6B). Per avere modelli 3D ad epoche differenti e comparabili, occorre che il rilievo sia ripetibile e i risultati confrontabili: l'utilizzo di punti di vincolo comuni ai due rilievi e definiti nello stesso sistema di riferimento garantiscono queste caratteristiche. L'analisi dei volumi cavati in un certo periodo è una informazione fondamentale per chi gestisce una cava, in quanto deve pianificare le attività in coerenza con le normative vigenti e le concessioni rilasciate. Gli errori nella definizione delle volumetrie sono legate all'accuratezza delle ricostruzioni 3D e all'algoritmo utilizzato per il calcolo. La "prova in bianco" su un'area che non ha subito variazioni tra i due rilievi serve a stimare adeguatamente tali errori. Si tratta di un metodo empirico che, in assenza di riferimenti e volumi di controllo, può fornire una stima verosimile dei risultati ottenibili con la metodologia adottata. In Fig. 6C il calcolo mostra un ammanco di circa 12 m³, che è coerente con la "prova in bianco" e può essere imputabile alla metodologia e al fatto che lo spostamento dei cumuli dal piazzale al pendio ha creato un incremento piccolo della quota e non identificabile dalla ricostruzione fotogrammetria.

5. CONCLUSIONI

La sperimentazione esposta mostra che le cave di marmo possono essere rilevate in modo veloce ed efficiente: una progettazione accurata del rilievo e un volo da drone commerciale permettono di ottenere un modello tridimensionale dettagliato e con una accuratezza di alcuni cm.

Il posizionamento di target a terra e il rilievo con ricevitori GNSS sono necessari per vincolare il modello in fase di orientamento delle immagini e garantire le accuratezze metriche dei prodotti. Questa è la fase più onerosa in termini di tempo e sforzi da parte dell'operatore; inoltre non sono trascurabili i rischi legati a crolli, frane, automezzi in movimento. La valutazione delle accuratezze in scenari a decrescente numero di vincoli dà indicazioni riguardo gli sforzi realmente necessari per il rilievo sul campo senza compromettere l'accuratezza metrica dei prodotti finali. Nel caso proposto, anche con un dimezzamento dei vincoli (da 25 a 11) si ottengono risultati accurati, idonei al monitoraggio e gestione dell'attività estrattiva. Occorrerebbe rivedere la distribuzione dei vincoli, in modo da evitare le distorsioni nelle zone perimetrali; più realistico e cautelativo sarebbe utilizzare 15 punti di vincolo (scenario 60%).

La potenzialità della metodologia si esprime nella possibilità di quantificare i cambiamenti intercorsi tra rilievi successivi, misurarli ed avere una identificazione delle volumetrie estratte o movimentate: questo aspetto è di grande interesse per chi, gestendo l'attività estrattiva, deve interfacciarsi con le concessioni rilasciate e le normative vigenti.

Il calcolo del volume compreso tra due superfici è influenzato dall'accuratezza e georeferenziazione delle due superfici, dalla modalità di calcolo del volume. Un approccio 2.5D, come quello proposto, risente della direzione impostata per il confronto, per cui diventa impossibile definire degli errori da modello ma è necessario progettare delle prove di tipo empirico per la stima degli errori nel calcolo delle volumetrie.

La "prova in bianco" qui proposta offre un calcolo delle volumetrie rimanenti coerenti con il residuo identificato nelle aree di attività estrattiva. In futuro si prevede di analizzare in modo più rigoroso le accuratezze dei calcoli volumetrici utilizzando come riferimento dei volumi noti per avere miglior stima e controllo degli errori.

BIBLIOGRAFIA

- Bügler, M., Borrmann, A., Ogunmakin, G., Vela, P.A., Teizer, J., 2017. Fusion of photogrammetry and video analysis for productivity assessment of earthwork processes. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(2), pp.107-123.
- Bui, D.T., Long, N.Q., Bui, X.N., Nguyen, V.N., Van Pham, C., Van Le, C., Ngo, P.T.T., Bui, D.T., Kristoffersen, B., 2017. Lightweight Unmanned Aerial Vehicle and Structure-from-Motion Photogrammetry for Generating Digital Surface Model for Open-Pit Coal Mine Area and Its Accuracy Assessment. In *International Conference on Geo-Spatial Technologies and Earth Resources* (pp. 17-33). Springer, Cham.
- Chen, J., Li, K., Chang, K. J., Sofia, G., Tarolli, P., 2015. Open-pit mining geomorphic feature characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42: 76-86.
- Dewez, T. J., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J., 2016. Facets: a CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R., Oliveti, M., Starita, P., 2017. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), p.103.
- GEA, presentazione a Confindustria Verona 24-11-2016: [http://www.confindustria.vr.it/confindustria/verona/organizer.nsf/attach/1EBB7984E5DCECEFC1258061003A88C3/\\$File/presentazione%20distretti%20marmo%20GEA.pdf?OpenElement](http://www.confindustria.vr.it/confindustria/verona/organizer.nsf/attach/1EBB7984E5DCECEFC1258061003A88C3/$File/presentazione%20distretti%20marmo%20GEA.pdf?OpenElement)
- Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J., 2015. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*, 7(9): 11933-11953.
- Istituto di ricerche della Camera di Commercio di Massa-Carrara, 2016. Rapporto Economia Massa-Carrara.
- James, M. R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F03).
- James, M. R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413-1420.
- James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, pp.51-66.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82: 10-26.
- Lingua, A. M., Dabove, P., Maschio, P. F., De Maio, M., 2014. L'integrazione di tecniche geomatiche per l'interpretazione multi-temporale delle variazioni di volume delle superfici di cava. *BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA*, 1, 61-71.
- Mancini, F., Castagnetti, C., Rossi P.,..., 2016. Risultati ottenuti nell'ambito della sessione "benchmark"-uso di immagini UAV per la ricostruzione 3D: esperienze condivise tra utenti (61° Convegno Nazionale SIFET, Lecce 8-10 Giugno 2016). *BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA*, 3, 88-95.
- Mancini, F., Castagnetti, C., Rossi, P., Dubbini, M., Fazio, N. L., Perrotti, M., Lollino, P., 2017. An Integrated Procedure to Assess the Stability of Coastal Rocky Cliffs: From UAV Close-Range Photogrammetry to Geomechanical Finite Element Modeling. *Remote Sensing*. 9(12), 1235.
- Raeva, P.L., Filipova, S.L., Filipov, D.G., 2016. Volume computation of a stockpile—a study case comparing GPS and UAV measurements in an open pit quarry. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, p.999.
- Rosnell, T., Honkavaara, E., 2012. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, 12(1), 453-480.
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., Capra, A., 2017. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 211-221.
- Rothermel, M., Haala, N., 2011. Potential of dense matching for the generation of high quality digital elevation models. In *ISPRS Hannover Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, (pp. 331-343).
- Salvini, R., Mastrorocco, G., Esposito, G., Di Bartolo, S., Coggan, J., Vanneschi, C., 2018. Use of a remotely piloted aircraft system for hazard assessment in a rocky mining area (Lucca, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), p.287.
- Santise, M., Passoni, D., Pagliari, D., 2014. Esperienze di fotogrammetria da UAV per il calcolo di volumi. *BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA*, 2014, 1-8.
- Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y., Tarolli, P., 2018. Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental Earth Sciences*, 77(6), p.220.
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S.G., Sousa, L.M., 2018. Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Engineering Geology*, 232, pp.22-33.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio l'Ing Corradeghini Paolo di 3DMETRICA, esecutore del rilievo, per avermi condiviso il dataset presentato in questa pubblicazione.