

Il laser scanner terrestre per il rilevamento e la modellazione di zone “instabili”: il versante sottostante il Tempio di Giunone (Agrigento)

Fabio Di Salvo, Mauro Lo Brutto

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo
Viale delle Scienze, Ed. 8, 90128 Palermo
e-mail {fabio.disalvo, mauro.lobrutto}@unipa.it

Riassunto

Lo studio descrive le operazioni del rilevamento laser scanner terrestre del versante sottostante il Tempio di Giunone nella Valle dei Templi di Agrigento. Il versante è caratterizzato dalla presenza di grossi blocchi rocciosi che si sono staccati dal basamento sommitale sul quale è costruito il Tempio; tale condizione evidenzia una situazione di generale “instabilità” che potrebbe nel tempo mettere a rischio le strutture archeologiche a causa di successivi distacchi.

Il lavoro è stato principalmente finalizzato alla verifica dell'utilizzo delle tecniche laser scanning per la produzione di informazioni metriche utili per l'interpretazione geologica dei fenomeni in atto e per le analisi geotecniche.

Il modello tridimensionale prodotto ha consentito un'accurata valutazione dei volumi e delle giaciture dei blocchi instabili ed è risultato particolarmente utile per lo studio geologico del versante anche in relazione a successive operazioni di monitoraggio o di integrazione con altre tecniche di rilievo.

Abstract

The study describes the terrestrial laser scanning survey concerning the slope below the Temple of Juno inside the Park of the Valley of the Temples in Agrigento. The slope is characterized by the presence of some large rocky blocks, that have been broken away from the summit stand, where the Temple is built; this circumstance causes a situation of general "instability" with a high risk level for the archaeological structures due to subsequent detachments.

The work was primarily aimed at the verification of the use of laser scanning techniques for the production of metric information useful for interpretation of geological phenomena and for geotechnical analysis.

The final three-dimensional model has allowed an accurate evaluation of volumes and positions of unstable blocks and was particularly useful for the geological studying in relation to subsequent monitoring or integration with other survey techniques.

Introduzione

Il rilievo di versanti e pareti rocciose con tecniche geomatiche rappresenta un importante supporto per studi di carattere geotecnico e geo-strutturale finalizzati alla progettazione di interventi di messa in sicurezza e di protezione di strutture antropiche e/o paesaggistiche. Tra le varie tecniche disponibili il rilievo laser scanner terrestre risulta una delle più efficaci e rapide per l'acquisizione di informazioni metriche tridimensionali con un elevato livello di dettaglio anche in aree molto estese. In particolare, molti laser scanner moderni hanno raggiunto portate che possono arrivare sino ad alcuni chilometri, consentendo l'esecuzione di rilievi in zone difficilmente raggiungibili. Gli esempi applicativi che negli ultimi anni si sono basati sull'uso di tale tecnologia sono numerosi e hanno riguardato studi per l'analisi di deformazioni e spostamenti (Scaioni, Alba, 2010), per la

ricostruzione geo-strutturale (Ferrero et al., 2011), per la modellizzazione tridimensionale di pareti rocciose e cave (Barbarella et al., 2009). In particolare, l'uso di modelli digitali 3D in ambito geologico come base per effettuare analisi e confronti di carattere geotecnico è sicuramente particolarmente vantaggioso sia per ricavare dimensioni e giaciture (Marsico et al., 2009) che linee di discontinuità (Slob et al., 2004).

Un aspetto particolarmente rilevante è inoltre dato dalla possibilità di integrare i dati ottenuti dal rilievo laser con quelli ricavati da altre tecniche di rilievo, in particolare fotogrammetria e interferometria SAR. Sempre più spesso infatti si ricorre al supporto di modelli provenienti da dati laser scanner per effettuare confronti di tipo metrico o per mappare aree nelle quali sono state individuate situazioni di criticità (Mazzanti et al., 2009).

Il lavoro svolto è stato finalizzato all'impiego delle tecniche laser scanning per il rilievo di un versante "instabile". In particolare, l'area oggetto di indagine si trova all'interno della zona archeologica della Valle dei Templi di Agrigento, a ridosso del noto Tempio di Giunone. Si tratta di un versante caratterizzato da un costone calcarenitico, su cui è costruito il Tempio, e da terreni detritici di copertura sul quale sono presenti numerosi blocchi e frammenti rocciosi staccatisi dalla parte sommitale del costone (Fig. 1).



Figura 1. Il versante roccioso sottostante il Tempio di Giunone.

Per il rilievo è stato utilizzato un laser scanner a tempo di volo *Riegl VZ400*, dotato di tecnologia denominata *Full Wave Form*, che consente attraverso l'analisi digitale del segnale laser di discriminare gli echi del segnale di ritorno, con il vantaggio pratico di penetrare la vegetazione e arrivare ad acquisire gli effettivi punti appartenenti al terreno e/o a superfici continue sottostanti.

Il lavoro ha consentito di valutare le potenzialità della tecnologia *Full Wave Form*, di definire quale fosse la metodologia più utile nella fase di elaborazione al fine di velocizzare le singole operazioni di *editing* e di ottenere dei modelli realmente utili ad un'indagine di tipo geotecnico. Attraverso un preciso *workflow* operativo è stato possibile ricavare un modello geometrico multi-risoluzione e scomposto in più parti, dal quale poter estrarre primitive bidimensionali (curve di livello e sezioni verticali) e ottenere una base per calcoli su volumetrie, giaciture e distanze fra gli elementi. La condizione di ricorrere ad una scomposizione dei dati iniziali, e dunque del modello finale, è risultata la più conveniente per provare a ricostruire l'evoluzione e le dinamiche meccaniche di distacco dei blocchi rocciosi dalla parte sommitale del costone.

Acquisizione dei dati

Il rilievo è stato condotto nell'arco di un giorno e mezzo utilizzando un laser scanner a tempo di volo *Riegl VZ400* capace di una portata massima di 600 m, una velocità di acquisizione fino a 125.000 punti al secondo e una risoluzione massima di 5 mm alla distanza di 100 m. Come già

evidenziato precedentemente, lo strumento impiegato è dotato di tecnologia *Full Wave Form* che consente di poter suddividere per ogni segnale laser di andata più echi di ritorno, cioè più punti per singola misurazione, incluso l'eco finale che rappresenta l'ultimo punto rilevato dallo strumento. Attraverso tale sistema è possibile ottenere più dati da una singola misurazione e soprattutto individuare più facilmente i punti che fanno parte del terreno o di superfici rocciose al di sotto di strati di vegetazione. La tecnologia *Full Wave Form*, presente in questa particolare tipologia di scanner, rappresenta un'evoluzione del sistema *multi-target* già impiegato sugli scanner aviotrasportati (Doneus et al., 2009; Pfennigbauer, Ullrich, 2009).

L'area rilevata è stata oggetto di una copertura molto ampia effettuata da più posizioni di scansione su tutto il versante. In totale sono state effettuate diciassette scansioni da quattordici punti stazione differenti, impostando lo strumento con risoluzioni di acquisizioni variabili da 2 cm a 10 cm alla distanza di 100 m. Sin dall'inizio è apparso chiaro che acquisizioni da sole zone esterne sarebbero risultate insufficienti a coprire interamente le zone d'ombra generate dai blocchi ed ottenere un buon livello di dettaglio. Sono state quindi effettuate sei scansioni dalla parte bassa del versante per avere una copertura d'insieme e altre otto dalla parte più alta, in modo da "coprire" totalmente i blocchi affioranti e il costone (Fig. 2). Tra queste alcune sono state anche effettuate al di sopra del costone roccioso, sul pianoro sul quale è impostato il Tempio di Giunone. L'elevato numero di scansioni ha consentito di ottenere una copertura pressoché completa del sito, superando quasi tutte le ostruzioni presenti.

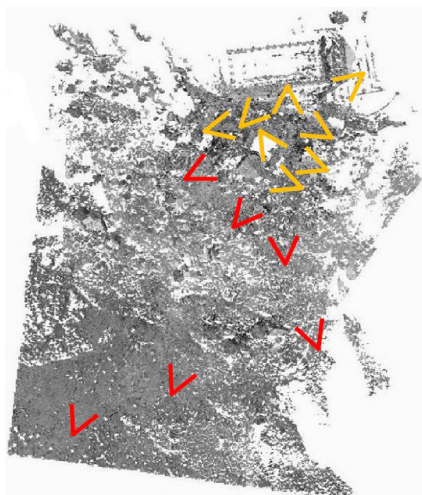


Figura 2. Schema dei punti stazione delle scansioni laser (in rosso le posizioni di scansione della parte bassa, in giallo quelle eseguite dalla parte più alta del versante).

Durante le operazioni di rilievo sono stati posizionati un numero congruo di target cilindrici retroriflettenti visibili da più punti stazione da utilizzare per la successive fasi di registrazione delle varie scansioni.

Per potere inquadrare cartograficamente il rilievo sono stati eseguiti due rilievi GNSS in modalità RTK rispettivamente da due vertici di riferimento precedentemente determinati rispetto alla stazione permanente di Agrigento appartenente alla rete GNSS dell'Università di Palermo. Il rilievo GNSS ha consentito di calcolare le coordinate dei target nel sistema cartografico UTM-ETRF2000.

La scelta di georiferire i dati è stata dettata dall'obiettivo sia di inquadrare cartograficamente il rilievo che di ottenere dei dati confrontabili con quelli eventualmente ottenuti in rilievi successivi; in questo modo sarà possibile utilizzare il rilievo anche per studi e analisi sull'evoluzione dell'area o per il monitoraggio di ulteriori fenomeni di crollo o di avanzamento di blocchi rocciosi.

Metodologia di lavoro

L'elaborazione ha seguito una precisa metodologia, in parte legata alle usuali operazioni di *editing* tipiche della gestione di dati laser scanner e in parte dipendente dagli obiettivi finali del lavoro, cioè la creazione di modelli geometrici di supporto per indagini di tipo geotecnico.

Per il processamento delle “nuvole di punti” e per le successive operazioni di modellazione si è optato per l'uso del software della Riegl *Riscan Pro*, compatibile con lo strumento utilizzato; per alcune operazioni di modellazione, in particolare per la ricostruzione ad alta risoluzione dei blocchi rocciosi e del costone, si è preferito utilizzare il software *Geomagic Studio*.

Lo schema di lavoro è stato impostato su una sequenza di operazioni ben precise, distinguibili in una fase iniziale di registrazione, georeferenziazione e filtraggio delle singole scansioni (attraverso la classificazione dei punti resa possibile dalla tecnologia *Full Wave Form* dello scanner) e una successiva fase di unione di tutte le scansioni in un'unica “nuvola di punti” seguita dalla sua scomposizione in gruppi omogenei di dati, distinti in base alle caratteristiche geomorfologiche del sito (blocchi rocciosi, costone e versante). Da questo momento in poi sono state impiegate delle procedure differenziate sui singoli gruppi in modo da ottenere modelli geometrici parziali a differente risoluzione. Alla fine le singole parti sono state ricomposte e gestite su un unico modello.

Processamento dei dati

Una prima procedura di allineamento delle scansioni è stata eseguita mediante riconoscimento automatico dei target, alla quale è seguita l'applicazione iterativa di una procedura automatica denominata “*Multistation Adjustment*” basata sull'algoritmo di allineamento ICP. Le scansioni sono state allineate rispetto ad un sistema di riferimento arbitrario coincidente con il sistema di riferimento della prima posizione di scansione. A partire dalle coordinate ricavate dal rilievo GNSS si è quindi eseguita una georeferenziazione di tutte le scansioni nel sistema UTM-ETRF2000.

Prima di procedere all'unione di tutte le scansioni, è stata eseguita una prima ed importante fase di eliminazione manuale dei punti non pertinenti, vale a dire quei punti appartenenti in maniera abbastanza evidente alla vegetazione o esterni alla zona di studio. Successivamente, sfruttando la capacità dello strumento di distinguere in vari echi le riflessioni registrate, è stato possibile identificare quattro categorie di punti o *target* distinti in: *single*, *first*, *other*, *last*. I punti effettivamente utilizzabili ai fini della modellazione sono quelli appartenenti al cosiddetto gruppo dei *single target*, composti da punti che hanno fornito un singolo eco di ritorno (blocchi e pareti rocciose, manufatti architettonici, ecc...) e quelli classificati come *last target*, cioè punti che rappresentano l'ultimo eco rilevato all'interno di un segnale scomposto in più echi di ritorno e che presumibilmente appartengono al terreno o ad una superficie compatta che si trova al di sotto di uno strato di vegetazione. All'interno delle categorie *first* e *other target* rientrano invece tutti quegli echi intermedi che si verificano quando il raggio laser subisce più riflessioni. A differenza di quello che avviene negli strumenti aviotrasportati dove vengono registrati un numero minimo di riflessioni multiple (in genere 5) ma viene anche eseguita una classificazione delle riflessioni (primo impulso, secondo impulso, ecc.) che può anche essere utilizzata per discriminare varie tipologie di oggetti (edifici, vegetazione, ecc.), negli strumenti con tecnologia *Full Wave Form*, a parte il primo impulso, non è possibile suddividere le riflessioni multiple, classificate invece all'interno di un'unica categoria. Per tale motivo i punti appartenenti alle categorie *first* e *other target* sono stati genericamente classificati come “vegetazione” e non utilizzati per le operazioni di modellazione. L'operazione di differenziazione degli echi è stata applicata singolarmente su tutte le scansioni.

L'unione di tutte le scansioni ha generato una “nuvola di punti” con oltre 72 milioni di punti. Tale quantità risulta eccessiva ai fini di un'elaborazione speditiva; un numero di punti elevato induce a problemi in fase di elaborazione per via di file troppo “grandi” e difficilmente gestibili. Inoltre, la densità dei punti risulta in molte zone sovradimensionata per la ricostruzione tridimensionale del sito. In considerazione dell'opportunità di poter ottenere risoluzioni differenziate, a secondo l'importanza attribuita alle singole zone presenti nell'area, l'intera “nuvola di punti” è stata

suddivisa in tre distinti gruppi: un gruppo di punti appartenenti ai soli blocchi rocciosi, un altro relativo al costone e infine un gruppo contenente i punti appartenenti al versante (Fig. 3). Per ogni gruppo sono state previste differenti risoluzioni finali e diverse procedure di modellazione, in modo da ottenere dei modelli parziali a diversa risoluzione esplorabili e utilizzabili sia singolarmente che tramite procedure di ri-assemblaggio in ulteriori modelli geometrici complessivi.

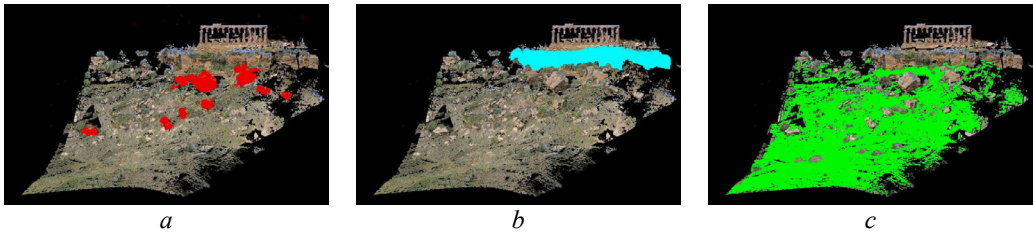


Figura 3. Suddivisione della "nuvola di punti" unita in tre gruppi di dati: (a) blocchi rocciosi, (b) costone, (c) versante.

Modellazione

Le operazioni di modellazione sono state condotte singolarmente per i tre gruppi di dati individuati. Per quanto riguarda i blocchi rocciosi sono state eseguite alcune operazioni supplementari di filtraggio per eliminare eventuali elementi disconnessi, incongruenze e piccole aree con vegetazione residua. L'eliminazione è avvenuta mediante *editing* semi-automatico, con individuazione manuale di quelle aree con presenza di criticità e applicazione di specifici filtri iterativi basati sul riconoscimento di punti ad elevata deviazione. I singoli elementi, così filtrati, sono stati infine ricampionati con una risoluzione di 2 cm, in modo da preservarne il più possibile i dettagli. Dai dati ricampionati sono state create delle singole *mesh* ad alta risoluzione tramite il software *Geomagic Studio* (Fig. 4). Il problema più evidente di tale operazione consiste nell'impossibilità di ottenere superfici perfettamente continue, soprattutto nella parte inferiore dei blocchi rocciosi, quella a contatto con il terreno. Non avendo informazioni sulla reale conformazione dei blocchi nelle parti non affioranti si è scelto di chiudere la parti inferiori con piani o superfici geometriche approssimative. Tale semplificazione sicuramente introduce una approssimazione nella stima dei volumi che però è stata ritenuta trascurabile ai fini delle successive analisi geotecniche.

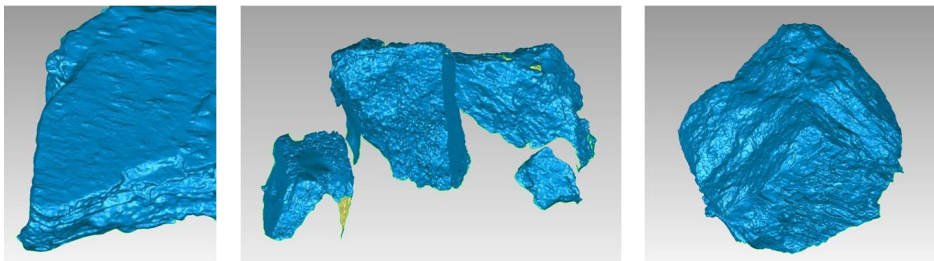


Figura 4. Esempi di modelli tridimensionali ad alta risoluzione dei blocchi rocciosi.

Il costone roccioso è stato modellato con una procedura analoga. Tuttavia, le operazioni di filtraggio sono state più impegnative per via della presenza di zone con vegetazione molto fitta, in cui la sola differenziazione degli echi non è stata sufficiente per discriminare correttamente i punti della parete. Come risultato è stata ottenuta una "nuvola" con zone caratterizzate da vistosi "vuoti" o con bassa densità di punti, solo in parte colmata dalla successiva operazione di triangolazione. Anche in questo caso i punti relativi al costone sono stati ricampionati con passo a 2 cm, in modo da mantenere i dettagli morfologici più significativi. In alcune zone non particolarmente estese e con

pochi punti, non sufficienti per una ricostruzione automatica della *mesh*, si è intervenuto con una fase di *editing* per ricostruire con le procedure a disposizione nel software utilizzato la superficie della parete (Fig. 5).

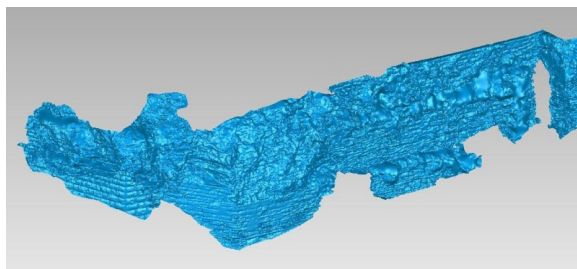


Figura 5. Modello tridimensionale del costone.

Per la modellazione del versante si è scelto di utilizzare la “nuvola di punti” iniziale, cioè completa dei blocchi e del costone, e di ricampionarla secondo una procedura di tipo *octree* per uniformare il dato ed eliminare ulteriori punti non pertinenti (Girardeau-Montaut et al., 2005).

Successivamente i punti sono stati ulteriormente filtrati attraverso una procedura iterativa, presente nel software *Riscan Pro*, denominata “*Terrain Filter*”, mediante la quale è possibile in modo del tutto automatico estrarre ed eliminare con elevata precisione ulteriori punti appartenenti alla vegetazione e ad elementi estranei o con inclinazione eccessiva (Axelsson, 2000).

I punti depurati dalla vegetazione, dai blocchi affioranti e da altri elementi estranei, sono stati utilizzati per la ricostruzione del DTM (*Digital Terrain Model*) dell’area con una risoluzione di 20 cm.

La creazione del modello tridimensionale complessivo del sito è stata ottenuta attraverso la ricollocazione delle *mesh* dei singoli elementi (blocchi e costone) sul DTM del versante (Fig. 6). Il modello risultante può a buon ragione definirsi “per parti”, essendo i vari gruppi di oggetti distinguibili e selezionabili gli uni dagli altri. Si è scelto infatti di mantenere separate le varie entità, in modo da gestire più facilmente il modello, attivando o disattivando i singoli elementi quando necessario e mantenendo le risoluzioni originarie, con l’obiettivo di facilitare le successive operazioni di estrazione di informazioni metriche (distanze, volumi) e generazione di primitive geometriche (curve di livello e sezioni verticali).

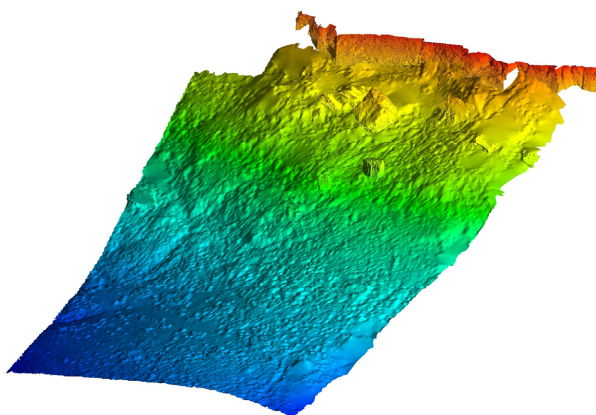


Figura 6. Modello tridimensionale complessivo dell’area, ottenuto dalla ricollocazione delle *mesh* dei blocchi e del costone sul DTM del versante.

Estrazione di informazioni metriche

La ricostruzione dettagliata dei blocchi rocciosi ha permesso di classificare e di calcolare in modo molto accurato la volumetria e la posizione, rispetto al costone roccioso, di ogni singolo blocco. I volumi seppur relativi alle sole parti affioranti risultano di notevole interesse per quantificare in via ipotetica la volumetria dell'originario costone, attraverso il ricorso a ipotesi ricostruttive di tipo geoevolutivo. Il calcolo dei volumi dei singoli blocchi è stato effettuato su versioni decimate delle *mesh* ad alta risoluzione; tale scelta è stata preferita in quanto una decimazione anche spinta (fino al 5% del dato di partenza) è perfettamente tollerabile con le precisioni solitamente raggiungibili in questo tipo di analisi ed è inoltre compatibile per la gestione in qualsiasi ambiente CAD.

Dal modello complessivo sono state estratte inoltre alcune primitive geometriche, curve di livello e sezioni verticali, per le quali è possibile impostare qualsiasi tipo di passo a seconda delle finalità dell'analisi. La possibilità di selezionare individualmente i blocchi permette inoltre di effettuare delle analisi parziali riguardanti i soli elementi geologici di interesse (Fig. 7).

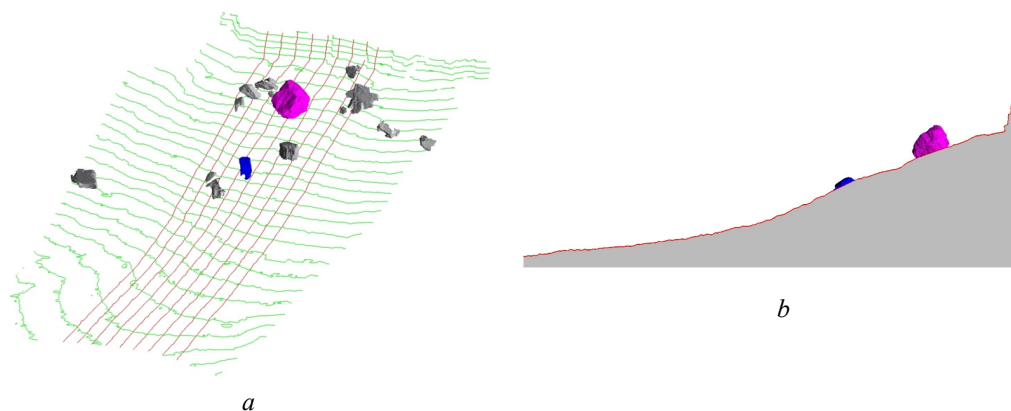


Figura 7. (a) Vista assonometrica delle curve di livello, delle sezioni verticali e delle mesh dei singoli blocchi; (b) Estrazione di una sezione verticale passante per due blocchi rocciosi.

Conclusioni

Il lavoro è stato condotto per la realizzazione di un modello tridimensionale facilmente gestibile del versante sottostante il Tempio di Giunone, con un risoluzione compatibile per analisi di dettaglio. La creazione di un modello suddiviso in gruppi di dati a diversa risoluzione ha consentito una più facile gestione dei dati metrici e ha fornito la possibilità di individuare e selezionare esclusivamente le entità di interesse. Inoltre, il modello ottenuto è risultato idoneo a costituire un sistema per l'estrapolazione di svariate informazioni geometriche, per scopi geotecnici. La possibilità di ricavare le sezioni di interesse lungo qualsiasi giacitura può agevolare infatti l'interpretazione delle dinamiche di distacco dei vari blocchi rocciosi, permettendo inoltre di valutare delle ipotesi sulla possibile evoluzione del fenomeno. Inoltre, il rilievo e la successiva elaborazione sono stati organizzati in modo da permettere un confronto con dati provenienti da successive campagne di monitoraggio o dall'integrazione con altre tecniche di indagine, come supporto ad ulteriori studi ed approfondimenti. Alcune criticità sono state riscontrate nelle operazioni di *editing*, che sono risultate particolarmente onerose dal punto di vista dei tempi di calcolo (soprattutto se confrontate rispetto alla "veloce" fase di acquisizione), nella difficoltà nell'uso di più software e nell'interscambio dei dati. La necessità di ricorrere a semplificazioni in aree con assenza parziale o totale di dati utili, costituisce inoltre una limitazione nel livello di dettaglio raggiungibile, che può risultare tuttavia relativamente trascurabili nell'ambito dell'interpretazione di fenomeni geologici e di verifiche geotecniche.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento, in particolare il dott. Giuseppe Presti, per la disponibilità ad accedere nell'area oggetto di rilievo, e la ditta Microgeo s.r.l. per il supporto tecnico.

Bibliografia

- Axelsson P. (2000), "DEM generation from Laser Scanner Data using adaptive TIN Models", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 B4/1: 110-117.
- Barbarella M., Gandolfi S., De Giglio M., Meffe A. (2009), "Il rilievo laser scanner per il monitoraggio di cave", *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre 2009, Bari, 263-268.
- Doneus M., Pfennigbauer M., Studnicka N., Ullrich A. (2009), "Terrestrial waveform laser scanning for documentation of cultural heritage", *Atti 22° Simposio Internazionale CIPA*, 11-15 ottobre 2009, Kyoto.
- Ferrero A.M., Migliazza M., Roncella R., Rabbi E. (2011), "Rock slopes risk assessment based on advanced geo structural survey techniques", *Landslides*, vol. 8: 221-231.
- Girardeau-Montaut D., Roux M., Marc R., Thibault G. (2005), "Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner", *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, 12-14 settembre 2005, Enschede, 30-35.
- Marsico A., Pignatelli C., Piscitelli A., Mastronuzzi G., Pennetta L. (2009), "Rilievo con laser scanner e ricostruzione 3D di blocchi accumulati da eventi estremi in Italia Meridionale", *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre 2009, Bari, 1377-1384.
- Mazzanti P., Moretti S., Tripoli O., Cipriani I., Carraro C., Sascor E., D'Aria D., Giudici D. (2009), "Analisi combinata Laser Scanner ed Interferometria SAR Terrestre per l'analisi dei crolli in roccia: un caso di studio nella città di Bolzano", *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre 2009, Bari, 1417-1422.
- Pfennigbauer, M., Ullrich, A., (2009). "Three-dimensional laser scanners with echo digitization", *Atti SPIE "Laser Radar Technology and Applications XIII"*, 6950.
- Scaioni M., Alba M. (2010), "Understanding changes and deformations on multi temporal rock face point clouds", in: Paparoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds), *Atti IAPRS Vol. XXXVIII Part 3A*, 1-3 settembre 2010, Saint-Mandé, 67-72.
- Slob S., Hack R., Van Knappen B., Kemeny J. (2004), "Automated identification and characterization of discontinuity sets in outcropping rock masses using 3D terrestrial laser scan survey techniques", *Atti EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium*, 7-9 ottobre 2004, Salisburgo, 439-443.