

Rapporti tecnici

INGV

**Esperienza di monitoraggio mediante
laser scanner nell'isola di Vulcano:
rilievo multi temporale della
Forgia Vecchia**

184



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

ESPERIENZA DI MONITORAGGIO MEDIANTE LASER SCANNER NELL'ISOLA DI VULCANO: RILIEVO MULTI TEMPORALE DELLA FORGIA VECCHIA

Arianna Pesci¹, Alessandro Bonforte², Giuseppe Casula¹, Giuseppe Puglisi², Gianpiero Aiesi²,
Alfio Amantia², Francesco Calvagna², Massimo Cantarero², Salvatore Consoli², Orazio Consoli²,
Marco Manni², Mario Marturano², Benedetto Saraceno²

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania)

184

Indice

Introduzione	5
1. Cenni sul laser scanner	5
2. Le scansioni effettuate	7
2.1 Rilievo 2009	7
2.2 Rilievo 2010	8
3. L'analisi dei dati	10
4. Confronti tra i rilievi 2010 e 2009	11
5. Conclusioni	13
Ringraziamenti	14
Bibliografia	15

Introduzione

Il presente lavoro è stato realizzato con l'obiettivo di divulgare le conoscenze acquisite nell'ambito del monitoraggio delle aree vulcaniche attive italiane mediante sistemi laser scanner terrestri.

Le sezioni INGV di Bologna, Roma, Napoli e Catania hanno lavorato congiuntamente sin dal 2007 per sperimentare queste strumentazioni e valutarne l'efficacia per lo studio delle variazioni superficiali in aree spesso caratterizzate da materiali a bassa riflettività e quindi non facili da rilevare. I primi esperimenti sono stati realizzati sul Vesuvio nel 2007 e la ripetizione delle misure ha permesso di ottenere una serie temporale di modelli digitali (DSM) che, analizzati e confrontati, hanno permesso di mappare i crolli di porzioni delle pareti vulcaniche, misurare con precisione le variazioni dei volumi in gioco e di ideare (work in progress) un sistema speditivo per riconoscere le frane attive ed eseguire in tempo reale il rilievo delle zone di interesse.

Nonostante l'esperienza vesuviana sia l'unica, per la ricchezza del data-base utilizzato, che al momento ha portato alla produzione di vari lavori scientifici [Pesci et al., 2007; Pesci et al., 2008ab; Pesci et al., 2009; Pesci et al., 2011a], è importante sottolineare che moltissime esperienze sono state fatte in questo senso, in tutte le aree vulcaniche di interesse. Sebbene i dati acquisiti non siano ancora sufficienti per realizzare un lavoro completo, hanno permesso di ampliare la conoscenza sulla metodologia e strumentazione utilizzate, sulle caratteristiche morfologiche delle aree osservate e sulle criticità del rilievo in ambiente vulcanico.

Con questo rapporto tecnico si vuole illustrare l'applicazione del sistema laser scanner per il rilievo del fianco settentrionale del cono della Fossa di Vulcano e i risultati preliminari.

La Fossa è un piccolo edificio vulcanico formatosi in seguito a numerose eruzioni che hanno prodotto un cono di materiale piroclastico (cenere, tufi e lapilli) negli ultimi 6000 anni [Keller, 1980; De Astis et al., 2006]. Sebbene la maggior parte delle eruzioni sono avvenute nella parte centrale del cono, alcune hanno interessato il suo fianco settentrionale, formando una sorta di cratere eccentrico, chiamato "La Forgia Vecchia" che crea una forte depressione morfologica su quel versante. L'intero cono della Fossa è soggetto a un'intensa erosione e alterazione provocata dalla circolazione di fluidi idrotermali. Già in passato il fianco settentrionale del cono vulcanico è stato interessato da fenomeni di dissesto con una frana che, nel 1988, ha riversato in mare circa $2 \cdot 10^5$ m³ di roccia nella zona antistante al porto di Levante provocando anche un piccolo tsunami [Barberi et al., 1994; Tinti et al., 1999]. L'area sovrastante la Forgia Vecchia è affetta da un'evidente instabilità gravitativa, aggravata dalla presenza dello stesso cratere eccentrico che ne accentua la ripida morfologia e dalla presenza di un importante campo di fumarole che riscalda e altera i corpi rocciosi. Già all'inizio degli anni '90 un forte incremento delle temperature e dell'intensità di emissione delle fumarole fu accompagnato da una significativa deformazione dell'intero versante sovrastante la Forgia Vecchia, con l'apertura di crack distensivi sul bordo craterico settentrionale, a corona del versante in movimento. Tale deformazione è fortemente correlata con l'andamento delle temperature alle fumarole, ed è stata interpretata come parzialmente dovuta all'espansione termoelastica del corpo roccioso che ha a sua volta aggravato l'incipiente instabilità del versante, innescando un ulteriore movimento verso valle [Bonaccorso et al., 2010].

1. Cenni sul laser scanner

I sistemi laser a scansione terrestre (TLS) sono ormai largamente diffusi ed utilizzati nelle più diverse applicazioni. Sono impiegati, ad esempio, per rilievi ambientali su siti interessati da dissesto idrogeologico e franoso oppure per rilievi in aree vulcaniche e montane per l'analisi di stabilità e la stima delle deformazioni in atto e relative variazioni di volumi. Sono svariate anche le applicazioni in ambito civile per l'analisi della stabilità degli edifici mediante misure ad alta precisione o per lo studio del deterioramento dei monumenti nell'ambito dei beni culturali ecc.

Esistono varie tipologie di laser scanner e nelle applicazioni terrestri a media o lunga portata, cioè dove la strumentazione viene posizionata ad alcune decine o centinaia di metri (finanche al chilometro e oltre) dalla superficie da rilevare, la misura dei punti viene effettuata mediante il calcolo del tempo di volo impiegato da un impulso laser per percorrere due volte (andata e ritorno) il tragitto strumento-oggetto. La differenza tra un laser scanner ed un distanziometro laser (stazione totale) consiste nella capacità del primo non solo di misurare la distanza senza l'ausilio di speciali riflettori ma di (nell'ambito di ogni scansione)

deflettere il fascio laser su una griglia angolare calibrata e quindi di inviare gli impulsi laser in varie direzioni a ricoprire di punti le superfici fisiche o in generale gli oggetti da rilevare.

Ogni strumento ha peculiari caratteristiche che lo rendono più o meno adatto alle varie applicazioni. Le caratteristiche più rilevanti che sono fondamentali da conoscere per programmare al meglio le campagne di misura sono: la massima portata, la frequenza di acquisizione, la precisione sulla singola misura, la divergenza del fascio laser e il minimo passo angolare di campionamento.

La precisione sulla singola misura è l'errore sulla misura della distanza calcolata per ogni impulso ed è variabile in funzione dello strumento utilizzato: un laser scanner architettonico di recente generazione, per esempio, ha una precisione di circa 1-2 mm, mentre uno scanner topografico generalmente ha una precisione di circa 5 mm; la divergenza, linearmente dipendente dalla distanza, è invece responsabile della grandezza dello "spot", ovvero la porzione di terreno (o dell'oggetto) illuminata dal fascio laser; il passo angolare governa invece il passo di campionamento dei punti della griglia e cresce linearmente con la distanza. Questi tre fattori, in particolare, contribuiscono a determinare la risoluzione effettiva del rilievo laser, cioè la risoluzione della nuvola di punti che si ottiene in seguito ad una scansione, in altre parole la capacità di distinguere due elementi differenti lungo le linee di scansione.

In che modo e in quale misura essi entrino e si combinino nel complicato calcolo della risoluzione finale, è un argomento molto discusso e ad oggi non definitivamente risolto.

Secondo alcuni autori il fattore dominante è la divergenza del fascio, per altri la risoluzione è legata alla scelta del passo di campionamento mentre per altri ancora ci sono delle complicate interazioni tra i due fattori [Lichti and Jamtsho, 2006; Iavarone, 2002; Optech, 2010].

Nel rapporto tecnico INGV 173 (2011) viene illustrato un esperimento per determinare in modo empirico la massima risoluzione ottenibile in relazione alla distanza di stazione. I risultati principali sono stati anche pubblicati in [Pesci et al., 2011b]: l'esperimento ha permesso di definire una relazione empirica tra passo di campionamento, risoluzione e distanza di lavoro nell'ambito dell'utilizzo dello scanner ILRIS-3D (Optech). In particolare, ammesso un limite inferiore pari a $D/3$, e cioè assumendo che non sia possibile distinguere elementi di tale dimensione o al di sotto di essa, si è ottenuta la relazione lineare: $max\ ss = TS \cdot (0.9 - 0.008 \cdot r(m))$ in cui ss è il passo di campionamento, $max\ ss$ è la massima dimensione del passo di campionamento ancora efficace nell'osservazione di un dettaglio di dimensioni TS ed r è la distanza tra lo strumento e la superficie osservata.

Le caratteristiche dello scanner utilizzato in questo lavoro sono illustrate in **figura 1**; la divergenza (sp) ed il minimo passo di campionamento (ss) raggiungibile crescono linearmente con la distanza; il rapporto sp/ss , al contrario, decresce rapidamente alle piccole distanze (tra 0 e 100 m) e tende a stabilizzarsi su un valore leggermente minore di 10.

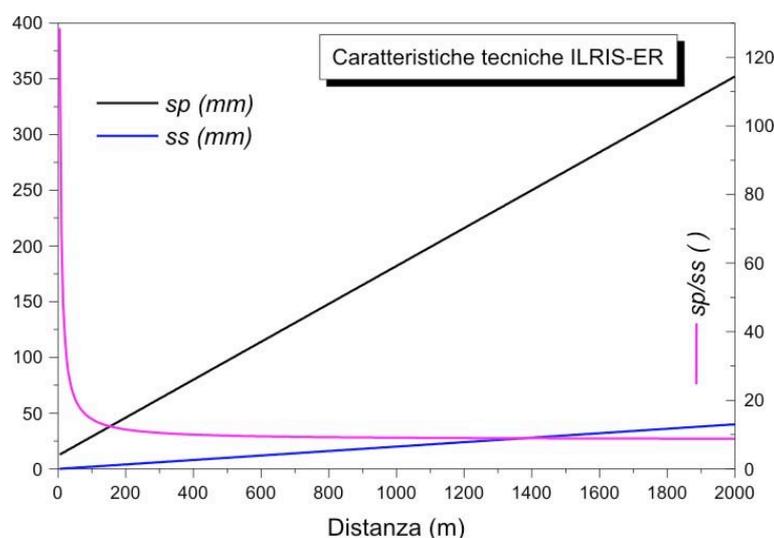


Figura 1. a) Il grafico della divergenza e del minimo passo di campionamento in relazione alla distanza di lavoro (linea nera e blu); b) il rapporto divergenza/passaggio di campionamento (linea fucsia).

2. Le scansioni effettuate

Il rilievo della Forgia Vecchia è stato eseguito per la prima volta nel Maggio 2009 e ripetuto nel Settembre 2010.

Dal punto di vista geometrico, le condizioni in cui si è operato non sono state ottimali. L'area di interesse, infatti, compresa tra i 100 ed i 200 m di altezza s.l.m. è mediamente inclinata di circa $25/30^\circ$ rispetto al piano orizzontale e presenta una complessa morfologia con vari cambi di pendenza che causano la parziale copertura di alcune zone, invisibili dal basso. Inoltre la distanza di lavoro, secondo il punto di stazione utilizzato, varia tra i 700 m e i 900 m.

È facile capire che si è effettuato il lavoro ai limiti delle capacità tecniche dello strumento, tenendo conto che: (i) secondo le specifiche tecniche, lo scanner ILRIS-ER, in presenza di materiali ad alta riflettività (80%), raggiunge portate > 1 km mentre con materiali a bassa riflettività (10%) la massima distanza di lavoro è di circa 650 m; (ii) l'angolo di incidenza tra il raggio laser e la superficie osservata è di $15/20^\circ$, accentuando gli effetti "ombra" cioè la copertura di alcune aree a causa di elementi frapposti tra il raggio laser e la superficie; (iii) l'osservazione a basso angolo crea anche una più larga impronta luminosa sulla superficie, generando più rumore nelle osservazioni.

In **figura 2** è mostrato uno schema molto semplificato, ma realistico, della zona e sono mostrati due punti di stazione dello scanner.

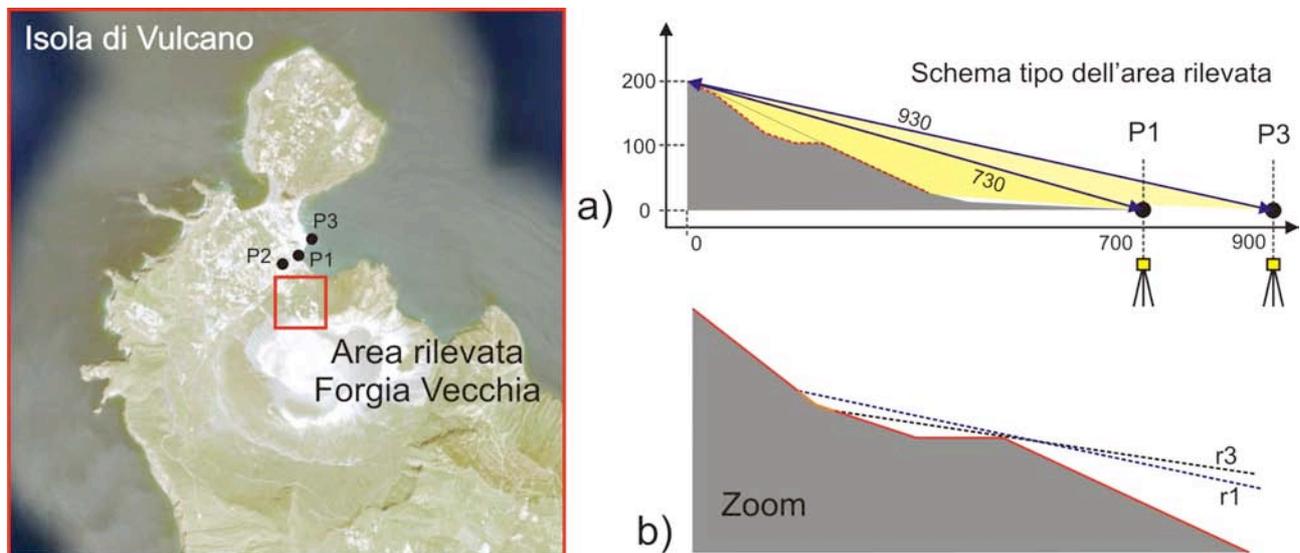


Figura 2. Lo schema semplificato di acquisizione e la localizzazione geografica dell'area rilevata. a) Le proporzioni reali delle acquisizioni da alcuni punti di stazione; b) l'inclinazione dei raggi e le zone di copertura.

2.1 Rilievo 2009

La prima campagna di misura TLS realizzata nell'Isola di Vulcano è stata eseguita nel Maggio 2009 con lo scopo di rilevare l'intero cratere del vulcano e di tentare il rilievo della Forgia Vecchia.

Trattandosi del primo rilievo effettuato sull'area, è stato necessario eseguire le scansioni da differenti punti di presa per capire la configurazione migliore da adottare per ottenere un buon risultato. In particolare, sono stati scelti tre punti di stazione: due ad una distanza di circa 750 m dalla sommità dell'area da rilevare (P1 e P2) ed il terzo (P3) ad una distanza di circa 950 m.

Da ognuna delle tre posizioni è stata eseguita una scansione e ottenuta la relativa nuvola di punti. Le caratteristiche del rilievo e le nuvole di punti sono illustrate in **figura 3 e 4**, rispettivamente. La quantità dei punti rilevati con ogni scansione e la densità di campionamento adottata sono evidenziate in giallo.

Number of shots:	2324736	2826677	1557452
Number of scan lines:	1152	1267	982
Number of points per line:	2018	2231	1586
Number of loops:	1	1	1
Scan task mode:	scan	scan	scan
Scan task id:	101	101	101
Pulse mode:	Last Pulse	Last Pulse	Last Pulse
Scan pattern:	Step Stare	Step Stare	Step Stare
Shot type:	Shot I3D	Shot I3D	Shot I3D
Scan start position:	Lower Left	Lower Left	Lower Left
Scan orientation:	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Scan in ER mode:	Yes	Yes	Yes
Roi id:	101	101	101
Roi start point:	(-13.337017, 1.642801)	(-15.440414, -6.528498)	(-13.065058, 4.906303)
Roi stop point:	(9.779457, 14.832787)	(15.233162, 10.880829)	(6.923891, 17.280415)
Scan average range(m):	490.59	448.08	636.28
X spot spacing(counts/mm):	10/98.1	12/107.5	11/140.0
Y spot spacing(counts/mm):	10/98.1	12/107.5	11/140.0

Figura 3. Le caratteristiche delle nuvole di punti rilevate da P1, P2 e P3

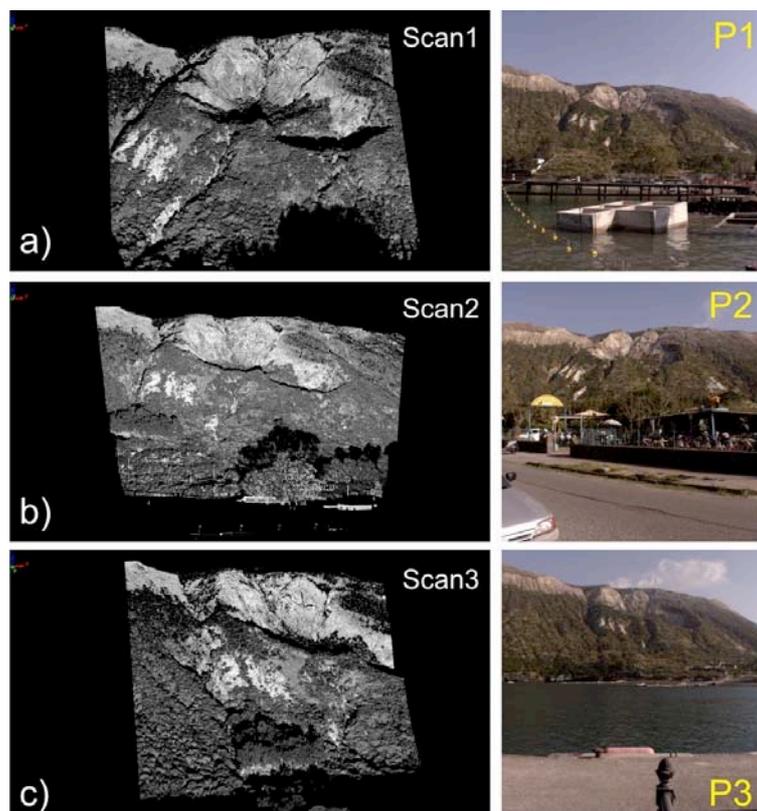


Figura 4. Le prime scansioni della Forgia Vecchia eseguite nel Maggio 2009. a) Nuvola di punti ottenuta misurando dal paese (noleggio auto) per una massima distanza di circa 750 m; b) nuvola di punti ottenuta misurando dal molo (aliscafi) per una massima distanza di circa 750 m; c) nuvola di punti acquisita dal molo (traghetti) per una massima distanza di circa 950 m.

2.2 Rilievo 2010

La seconda campagna di misura sull'isola di Vulcano è stata effettuata nel Settembre 2010. In considerazione della geometria a basso angolo d'incidenza, sono state eseguite nove scansioni dai tre punti di stazione sopra citati. In realtà, questo tipo di misura non richiede precisione nella rioccupazione dei punti di stazione: è sufficiente posizionarsi negli stessi siti per osservare le superfici con angoli di vista simili.

Anche in questo caso sono stati adottati gli stessi criteri di misura e le precisioni e risoluzioni sono pressoché le stesse del 2009. In **figura 5** sono mostrate tutte le nuvole di punti: scan8 è una sottoscansione, cioè una scansione multipla in cui si è definita una zona a maggiore densità di punti.

Il dettaglio di questa nuvola di punti è mostrato in **figura 6**: la vista frontale e la vista aerea sono fornite per mostrare come, anche nel caso di maggiore densità, le ombre non possono essere completamente eliminate e restano delle zone non rilevate (**figura 6**).

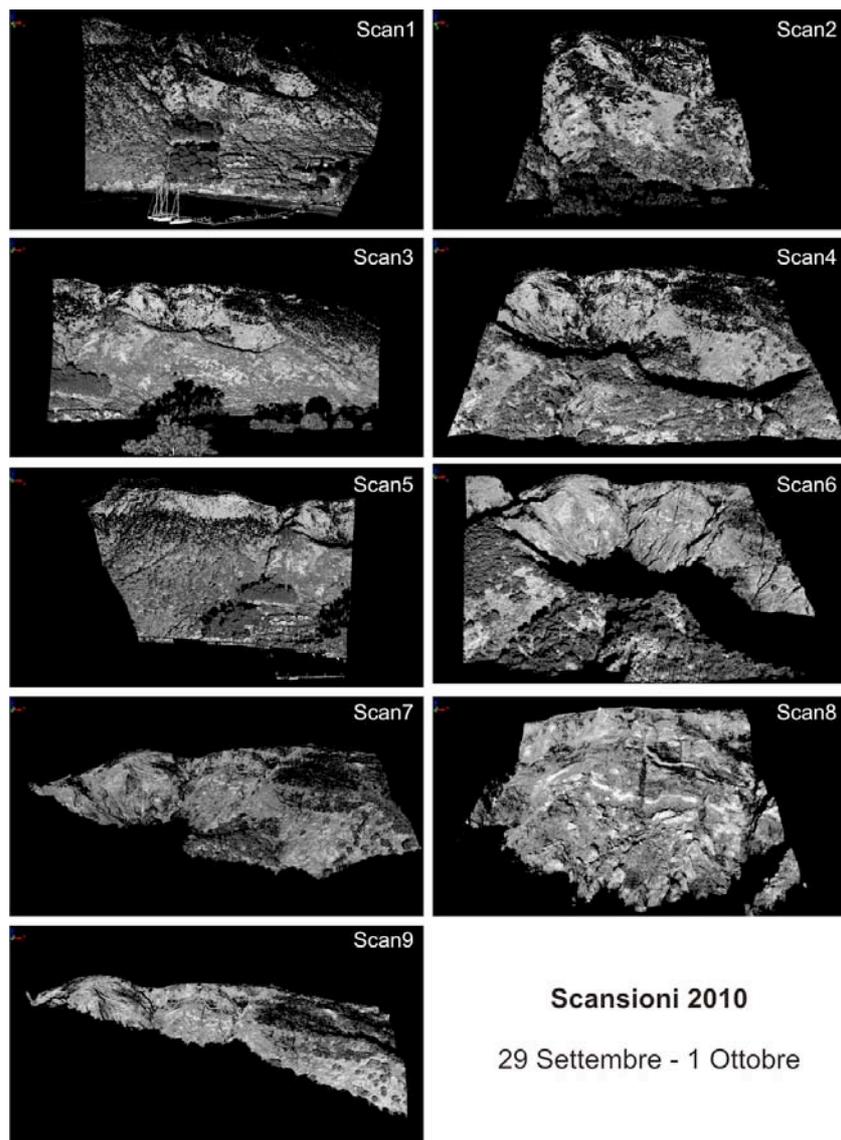


Figura 5. Le scansioni effettuate da 3 punti di stazione. I primi 2 sono ad una distanza massima approssimativa di 750 m, ed il terzo di circa 950 m. La scansione 8 è stata rilevata con alta densità sulla parte centrale dell'area osservata.

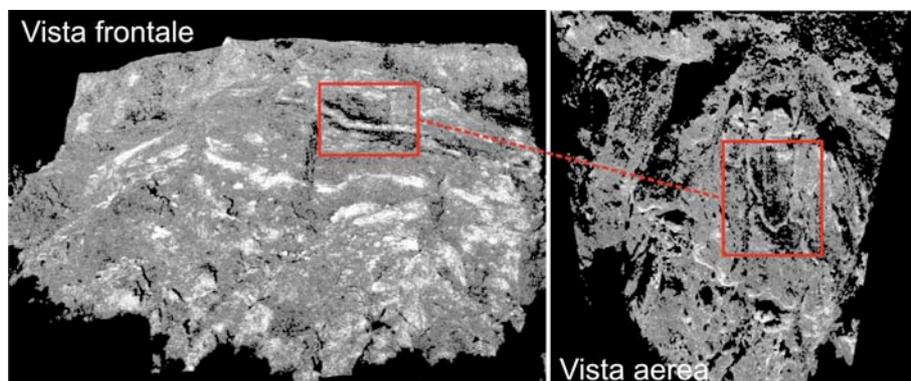


Figura 6. Particolare della scansione 8. La nuvola di punti è mostrata frontalmente e con la vista aerea. La zona rossa mostra un'area dalla morfologia "piatta" che è geometricamente sfavorevole da rilevare. Infatti, si evidenzia una mancanza di dato.

3. L'analisi dei dati

I dati sono stati processati mediante il software Polyworks, secondo procedure ormai testate. Il dato è stato ripulito eliminando i punti esterni all'area d'interesse e le zone interessate dalla fitta vegetazione al fine di semplificare le successive operazioni di allineamento e unione delle scansioni.

Le nuvole di punti che si riferiscono alle campagne sia del 2009 che del 2010 sono state allineate (tramite il modulo IMAAlign) e unite insieme utilizzando gli algoritmi ICP (Iterative Closest Point) per creare, per ogni anno, un modello preliminare completo (**esempio in figura 7**). La procedura è ormai nota e molto diffusa: si parte da un allineamento "grezzo" mediante il riconoscimento di punti omologhi su due immagini (nuvole di punti) e si procede alla rototraslazione. In seguito, s'inizia il ciclo di allineamenti automatici impostando il raggio di azione nell'intorno di ogni punto. Come meglio descritto in Pesci et al., (2007) il modulo di allineamento crea un modello (DTM) preliminare di lavoro e opera minimizzando i vettori normali tra gli elementi delle superfici considerate.

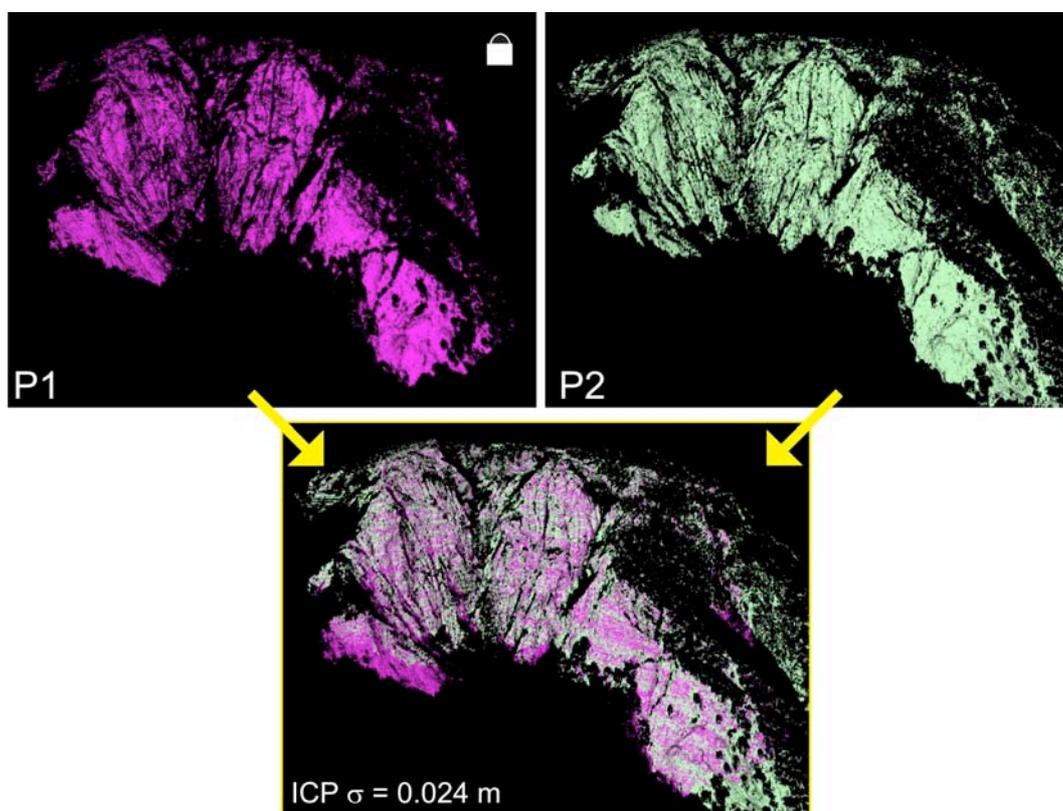


Figura 7. L'allineamento mediante algoritmi ICP (IMAAlign, Polyworks). La scansione acquisita da P1 è stata bloccata e utilizzata come riferimento (simbolo lucchetto nella figura). La precisione dell'allineamento è di 2.4 cm.

Le matrici di trasformazione (roto-traslazione) relative ad ogni nuvola di punti allineata sul riferimento scelto (nell'esempio, sulla scansione rilevata dal punto P1) vengono salvate in formato ascii (file.txt). In questo modo è possibile lavorare sulle singole nuvole di punti già nel sistema di riferimento comune.

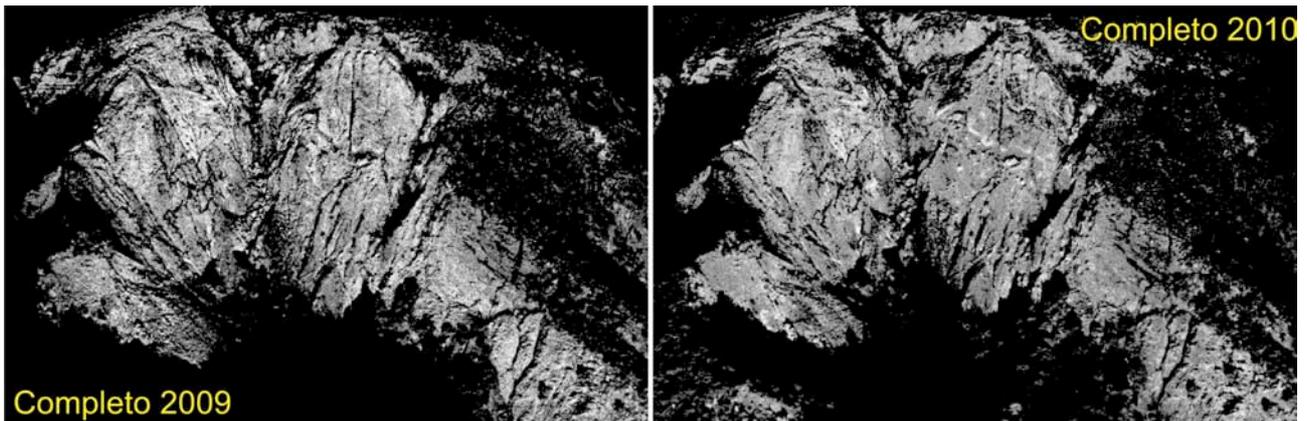


Figura 8. L'unione totale delle nuvole di punti per il rilievo 2009 e 2010. Il dato è colorato in funzione dell'intensità.

4. Confronti tra i rilievi 2010 e 2009

In questo paragrafo sono illustrati i risultati del confronto diretto tra le nuvole di punti rilevate nell'ambito delle campagne di misura 2010 e 2009, per evidenziare le variazioni morfologiche verificatesi nell'intervallo (circa 1 anno) intercorso tra le due misurazioni.

In considerazione del fatto che, come ampiamente descritto nelle pagine precedenti, la geometria di rilievo e la conformazione delle pareti osservate hanno creato degli effetti di ombra nelle nuvole di punti, si è deciso di lavorare inizialmente su un confronto preliminare. Un confronto basato sull'analisi di sole due scansioni maggiormente rappresentative del rilievo 2009 e 2010.

Questa scelta è nata dalla necessità di ottenere un risultato che non fosse affetto da alcun tipo di errore sistematico: utilizzare, infatti, l'unione di tutte le scansioni potrebbe introdurre errori legati alla precisione dell'allineamento. Questo perché, al momento, non si è ancora accertato e quantificato l'effetto eventualmente prodotto dalle zone di ombra sulle precisioni finali di allineamento. Utilizzando invece due singole scansioni rappresentative dell'area, in particolare le scansioni rilevate dal punto P1, si è sicuri che i punti non possono essere affetti da distorsione ed il confronto diventa maggiormente significativo.

La procedura utilizzata per confrontare i dati è concettualmente la stessa utilizzata nell'allineamento delle immagini. Inizialmente la scansione (Scan2) del 2009 è stata bloccata sulle sue coordinate, la scansione (Scan6) del 2010 è stata ad essa allineata in modo preciso, utilizzando gli algoritmi ICP integrati nel modulo IMAlign (Polyworks) e la matrice di roto-traslazione è stata esportata.

Successivamente, le nuvole di punti sono state caricate nel modulo di ispezione delle immagini IMInspect e la nuvola di punti 2010 è stata trasformata utilizzando la matrice precedentemente creata.

Il confronto diretto è stato realizzato con il metodo della distanza punto-superficie, che è anche il metodo di *default* utilizzato dal modulo sopra citato. In pratica, zona per zona, viene calcolata la distanza tra il punto considerato della scansione Scan6/2010 e la corrispondente superficie di riferimento nel suo intorno vicino, calcolata interpolando i dati della scansione Scan2/2009. La distanza punto-superficie è fornita lungo la normale. I risultati sono mostrati in **figura 9 e 10**: nel primo caso la nuvola di punti è colorata in base al valore delle differenze nella scala arcobaleno tra -2 m e 0.2 m; nel secondo caso, la stessa scala colori rappresenta le variazioni tra -0.1 m e 0.1 m.

La zona d'interesse nella parte centro-sommitale della Forgia Vecchia mostra chiaramente (figura 9d) una piccola area (circa 2-3 m di larghezza) di forti residui negativi. L'osservazione di dettaglio mediante la navigazione dentro le nuvole di punti e l'ingrandimento della parte in esame, ha permesso di distinguere con chiarezza che tali differenze derivano dal crollo (o distacco) di un blocco di roccia della dimensione di circa 1-2 m, con conseguente arretramento della parete. La forma piuttosto geometrica dell'area in arretramento e la sua localizzazione su un tratto di parete pressoché verticale in cima a un'incisione dovuta alla forte erosione da parte delle acque di ruscellamento, lascia supporre che si tratti del distacco di una singola porzione rocciosa.

L'intera area, nell'esame più specifico con una scala più stretta (fig. 10), mostra zone con diverso comportamento: in particolare si distingue una zona centrale, in cui sembrano prevalere i differenze negative,

una zona sommitale con variazioni positive ed una leggera tendenza positiva (valori zero-positivi) nella parte più bassa. Nonostante le differenze tra i due rilievi forniscano delle indicazioni al limite della precisione strumentale alle distanze di misura utilizzate, la distribuzione dei residui suggerisce un lento movimento franoso o di “ribaltamento” del tratto sub-verticale del versante. Sul bordo del cratere sovrastante quest’area sono infatti presenti alcune fratture distensive tipiche delle nicchie di distacco [Bonaccorso et al., 2010], che possono essere correlate con questo tipo di movimento.

Tuttavia va precisato che questa è una interpretazione forte che dovrà essere confermata con ulteriori campagne di misura laser scanner già programmate per il 2011 dal TTC 1.3, pertanto oltre a mostrare le mappe delle differenze calcolate, non si ritiene cauto proporre ulteriori interpretazioni.

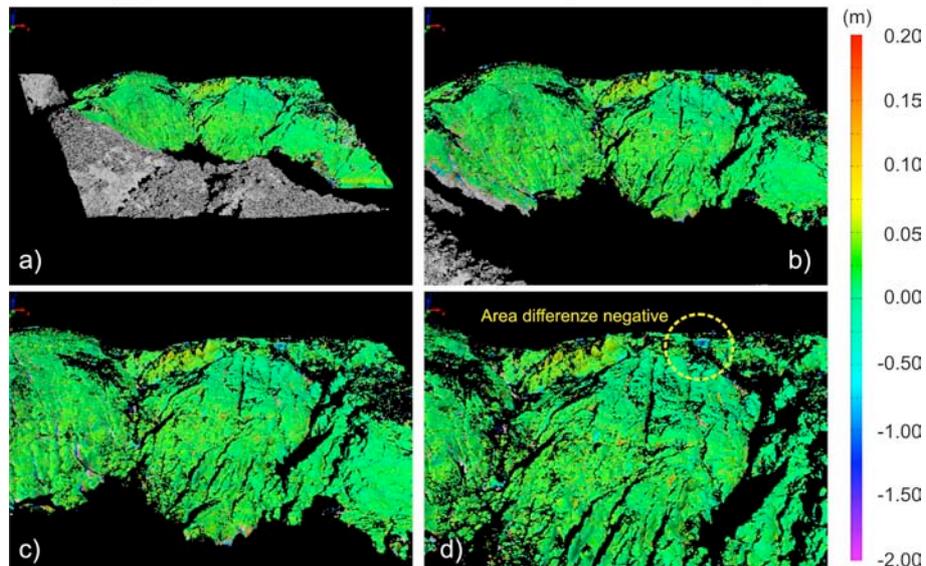


Figura 9. Mappa dei residui 2010-2009. ($-2 \text{ m} < x < 0.2 \text{ m}$). Le quattro viste sono fornite avvicinandosi all’area per mostrare sia complessivamente che nel dettaglio la mappa dei residui.

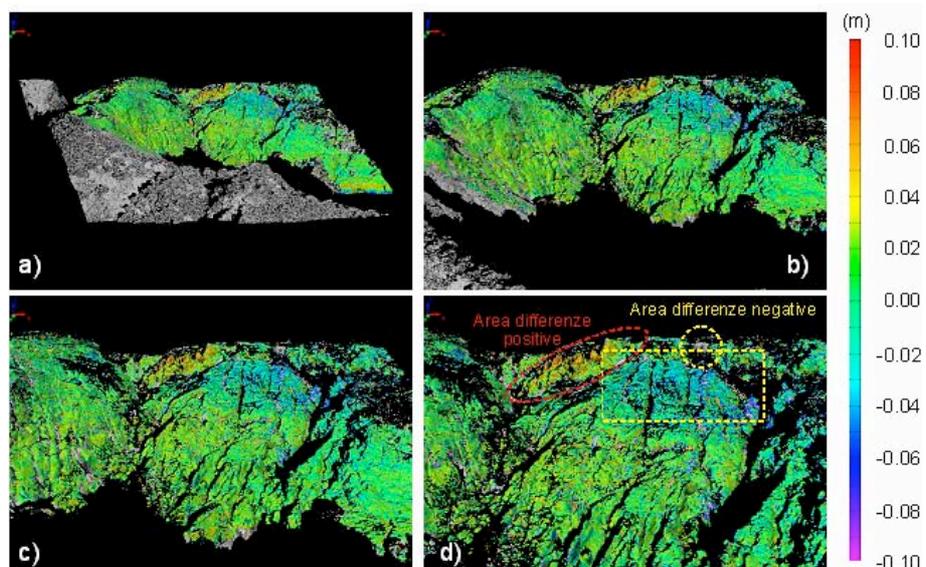


Figura 10. Mappa dei residui 2010-2009 ($-0.1 \text{ m} < x < 0.1 \text{ m}$). Le quattro viste sono fornite avvicinandosi prospetticamente all’area per mostrare sia nel complesso che nel dettaglio la mappa dei residui.

5. Conclusioni

Le scansioni effettuate utilizzando lo scanner terrestre ILRIS-ER (Optech) sono state caratterizzate da una difficile geometria di acquisizione che ha reso difficile la creazione di un modello definitivo dell'area della Forgia Vecchia.

In particolare, durante la campagna di misura del 2010 sono state effettuate numerose scansioni con lo scopo di coprire il più possibile l'area di interesse.

In seguito alle operazioni di allineamento delle immagini operate mediante il software Polyworks (IMAlign) è stato eseguito il confronto diretto di due scansioni maggiormente significative e sono state messe in evidenza 3 distinte aree caratterizzate da peculiare stile deformativo.

La prima, una piccola area nella parte sommitale destra della figura 9 (geograficamente a Est), mostra un arretramento o comunque una zona di differenze negative di circa 1 m, probabilmente legate al distacco di una roccia a causa dell'erosione di quel tratto di parete sub-verticale. La seconda parte, sempre nella zona sommitale, mostra residui positivi (avvicinamento) con una tendenza di circa 5 cm. La terza zona, nella parte centrale dell'area rilevata, mostra un generale debole arretramento, con valori di -2/-3 cm probabilmente legati all'erosione diffusa.

Inoltre, sempre nella fascia centrale, procedendo verso il basso si nota una piccola tendenza a valori positivi sempre dell'ordine di pochi centimetri, probabilmente legato all'accumulo del materiale eroso dalla parte immediatamente superiore.

Bisogna notare che la densità delle nuvole di punti varia in base alla distanza tra lo scanner e l'elemento osservato; quindi nelle zone più lontane il passo è compreso tra 10 cm e 15/ cm.

Va anche ricordato che l'analisi è effettuata confrontando la scansione di riferimento del 2010 e la scansione di riferimento del 2009 dopo avere operato l'allineamento della prima sulla seconda; per questo motivo, i risultati si devono intendere in senso relativo. Nonostante ciò, è importante sottolineare che, le zone in cui le differenze sono distribuite secondo una netta tendenza rappresentano le reali variazioni avvenute nel periodo intercorso tra le due campagne.

La foto dell'area della Forgia vecchia scattata durante la campagna di misura del 2010 (dal punto P2) è inserita per localizzare visivamente le zone di massima variazione (fig. 11). È interessante notare che la sommità della zona, caratterizzata dalla tendenza in avvicinamento e dal distacco roccioso, è incoronata da un allineamento di fumarole, confermando la probabile relazione tra l'instabilità del versante e l'attività idrotermale. Infatti, l'instabilità gravitativa legata alle caratteristiche dei materiali che costituiscono il cono della Fossa e all'assetto geomorfologico del sito (con una forte pendenza ulteriormente aggravata dalla presenza di un cratere eccentrico che incide un versante già in erosione), è accentuata dalla circolazione di fluidi ad alta temperatura presenti nel corpo roccioso che, oltre ad indurre uno stress aggiuntivo connesso al surriscaldamento, ne provocano una rapida alterazione riducendone la coesione.

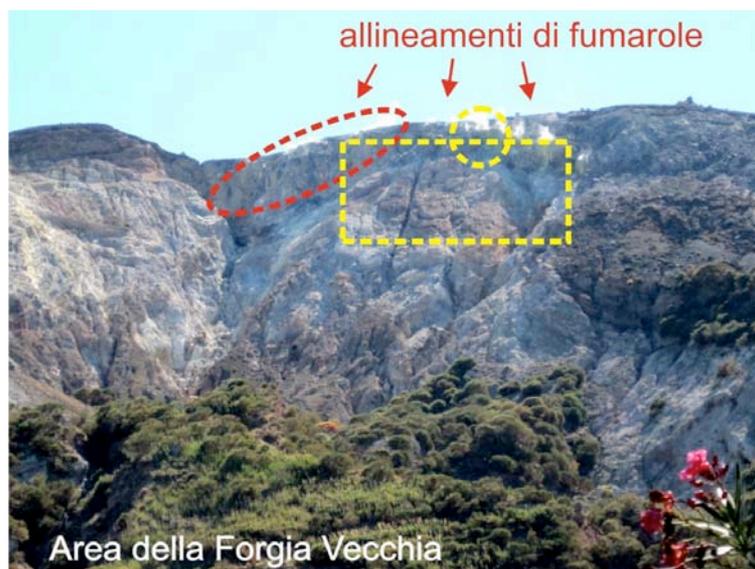


Figura 11. Foto scattata durante le misure dal punto di stazione P2 (2010).

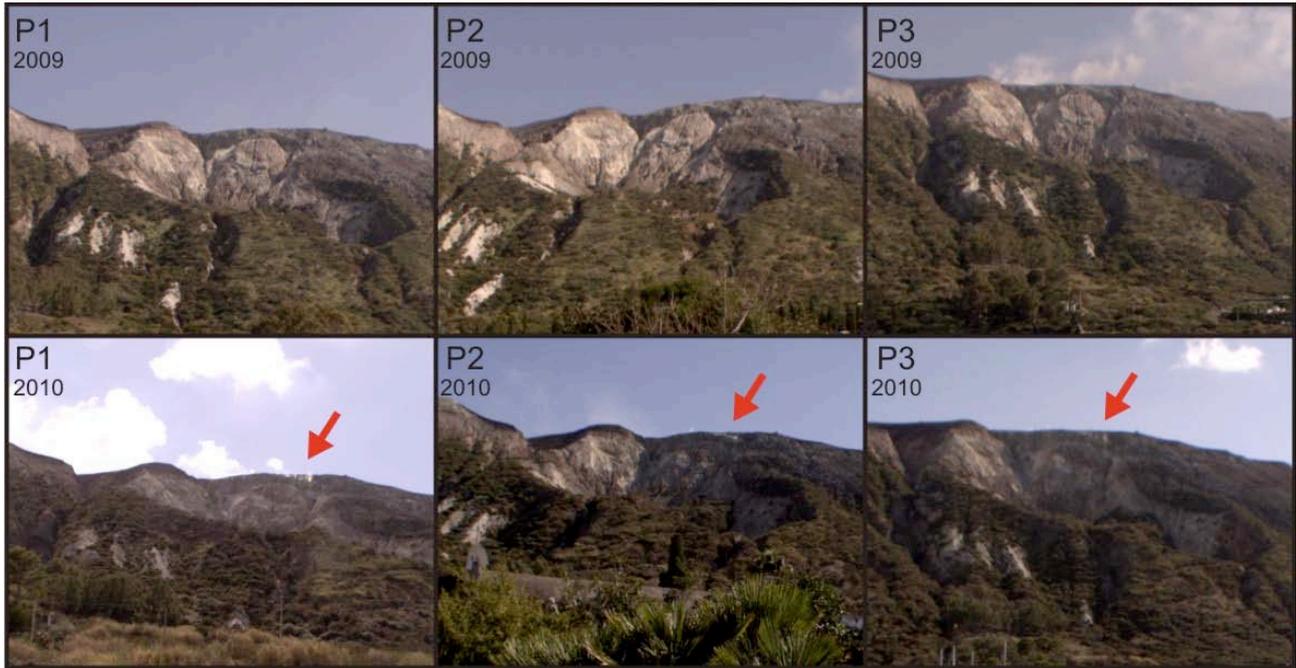


Figura 12. Tre foto rappresentative dell'area scattate dai punti di stazione P1, P2 e P3 nelle campagne di misura 2009 (maggio) e 2010 (settembre). Le frecce rosse indicano le zone delle fumarole sulla corona dell'area.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Giordano Teza ed Antonio Galgaro (Università di Padova) per la concessione delle batterie supplementari, fondamentali per il completamento del rilievo.

Bibliografia

- Barberi F, A Gandino, A Gioncada, P La Torre, A Sbrana and C Zenucchini, The deep structure of the Eolian arc (Filicudi-Panarea-Vulcano sector) in light of gravity, magnetic and volcanological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 61 (1994) 189-206.
- Bonaccorso A, A Bonforte, A Gambino, Thermal expansion-contraction and slope instability of a fumarole field inferred from geodetic measurements at Vulcano. *Bull Volcanol* 72 (2010) 791-801.
- De Astis G, PD Kempton, A Peccerillo, TW Wu, Trace Element and isotopic variations from Mt. Vulture to Campanian volcanoes: constraints for slab detachment and mantle inflow beneath southern Italy. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. doi:10.1007/s00410-006-0062-y (2006).
- Iavarone A, Laser scanner fundamentals. *Professional Surveyor*, 22. Available online at: <http://www.profsurv.com> (2002) (accessed: 18.02.2011).
- Innovmetric, Innovmetric PolyWorks software description. <http://www.innovmetric.com> (accessed: 18.02.2011) (2010).
- Keller J, The island of Vulcano. *Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia* 36 (1) (1980) 369-414.
- Lichti DD and S Jamtsho, Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogrammetric Record*, 21 (114) (2006) 141-160.
- OPTEC™ ILRIS-3D Operation Manual (2006). Optech Incorporated Industrial & 3D Imaging Division, 0040170/Rev A, 1-147.
- Pesci A., F Loddo, D Conforti, The first terrestrial laser scanner survey OVER VESUVIUS: the high resolution model of VOLCANO crater (Napoli, Italy). *International Journal of Remote Sensing*, 28 (1) (2007) 203-219.
- Pesci A., G Teza, G Ventura, Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy), *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 51, (4) (2008a) 633-653.
- Pesci A, G Teza, Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach. *Annals of Geophysics*, 51 (2008b) 839-848.
- Pesci A, G Casula, F Loddo, MG Bianchi, G Teza, OPTECH™ ILRIS-3D TERRESTRIAL LASER SCANNER: SHORT USER GUIDE, *INGV Rapporto Tecnico* 109, (2009) 6-17.
- Pesci A, G Teza, E Bonali, Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization. *Remote Sens.* 3 (2011b) 167-184; doi:10.3390/rs3010167
- Pesci A, G Teza, G Casula, F Loddo, P De Martino, M Dolce, F Obrizzo, F Pingue, 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*, (2011a) In press. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.12.002.
- Pesci A, E Bonali, Un esperimento per definire la reale risoluzione di un rilievo laser a scansione terrestre, *INGV Rapporto Tecnico* 173, 2011.
- Tinti S, E Bortolucci, C Romagnoli, Computer Simulation of tsunamis due to sector collapse at Stromboli, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 61 (1999) 121-137.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia