

Rapporti tecnici

INGV

**La prima esperienza Laser Scanner per
il rilievo del cratere dell'Isola di
Vulcano: la creazione del modello a
scala variabile per integrazione con
rilievi aerofotogrammetrici**

186



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

LA PRIMA ESPERIENZA LASER SCANNER PER IL RILIEVO DEL CRATERE DELL'ISOLA DI VULCANO: LA CREAZIONE DEL MODELLO A SCALA VARIABILE PER INTEGRAZIONE CON RILIEVI AEROFOTOGRAMMETRICI

Arianna Pesci¹, Giuseppe Casula¹, Alessandro Bonforte², 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)

186

Indice

Introduzione	5
1. Area di studio	6
2. Descrizione delle misure	7
3. Modelli	12
4. Conclusioni	14
Ringraziamenti	14
Bibliografia	14

Introduzione

Il laser scanner, o laser a scansione terrestre (TLS), è uno strumento di rilievo non distruttivo che permette di misurare una grande quantità di punti (milioni) distribuiti sulle superfici fisiche osservate. Per ogni punto si ottengono le coordinate geometriche cartesiane x , y e z e un valore d'intensità, generalmente fornito nell'intervallo $[0, 255]$, cioè nella scala di grigi. L'intensità è una variabile strettamente correlata alla rugosità dei materiali e alle condizioni di umidità al momento del rilievo e, in certi casi, fornisce indicazioni sullo stato di alterazione delle superfici [Pesci et al., 2007; Franceschi et al., 2009]. Il risultato di una singola scansione, cioè la nuvola di punti, è quindi composto dall'insieme delle coordinate e delle intensità (x, y, z, I) di tutti i punti misurati nello stesso sistema di riferimento. I sistemi laser a scansione terrestre (TLS) sono ormai largamente diffusi ed utilizzati nelle più diverse applicazioni. Essi vengono impiegati per rilievi sia ambientali, (per esempio in aree di dissesto idrogeologico o in aree vulcaniche e montane), che architettonici, principalmente in ambiente urbano, e sono ancora molti altri i campi di applicazione. Per esempio: nel rilievo del territorio, grazie alla rapida acquisizione di una elevata quantità punti, è facile la creazione di sezioni, curve di livello e volumetrie; in ambito geologico, anche nelle zone inaccessibili, il sistema permette di definire dei precisi modelli di riferimento (DEM) per lo studio della stabilità dei versanti ed il monitoraggio dei fenomeni di dissesto [Pesci et al., 2011a]; in architettura, grazie all'alta risoluzione ed alla possibilità di integrare l'informazione TLS all'informazione ottenuta dalle immagini digitali (RGB) di fotocamere calibrate è possibile ottenere modelli molto accurati e dettagli morfologici per il restauro, la progettazione, etc..(vedi per esempio: www.centrorestaurovenaria.it). In particolare, è possibile associare ad ogni punto sia il valore di intensità nella scala di grigi, sia il contenuto di colore dell'immagine acquisita (RGB) ed utilizzare una informazione più completa per lo studio della superficie in esame [Pesci et al., 2010]. Il laser scanner ILRIS-ER, che è la versione più potente del modello ILRIS-3D (www.optech.ca) ha delle precise specifiche tecniche fornite nelle *brouchure* ufficiali (Fig.1) della casa madre *Optech* (inc), ma riassumendo al massimo si isolano 3 parametri fondamentali: portata, divergenza e passo di campionamento.



Figura 1. *Brouchure* ILRIS 3D (ER): le caratteristiche del Laser Scanner. In rosso sono sottolineati i parametri più importanti in termini di divergenza, passo di campionamento, risoluzione, ecc. ecc..

La portata è la massima distanza misurabile e dipende dall'intensità del segnale di ritorno, generalmente correlata con la rugosità del materiale osservato; la divergenza (sp) è una caratteristica del segnale (e dello strumento utilizzato) e cresce linearmente con la distanza (R) secondo la formula: $sp(mm) = 0.17 \cdot R(m) + 12$; il passo di campionamento (ss) è la distanza tra due punti sulla stessa linea di scansione e dipende, anch'esso, dalla distanza di lavoro: $ss(mm) = 0.02 \cdot R(m)$. Secondo queste formule, alla distanza di 100 m, l'impronta laser sulla superficie (supposta ortogonale) risulta essere 29 mm ed il passo di campionamento 2 mm. È importante notare che il passo di campionamento può essere aumentato per ridurre i tempi di acquisizione senza tuttavia, con i dovuti accorgimenti, ridurre la precisione finale della misura [Pesci et al., 2011b].

Seguendo la stessa ottica del rapporto tecnico 184 (INGV) in cui veniva descritta nel dettaglio l'attività svolta sull'Isola di Vulcano per il monitoraggio dell'area della Forgia Vecchia, qui è presentato il lavoro di rilievo e analisi dati effettuato nel Maggio 2009 per la modellazione di precisione del cratere di Vulcano. Nel corso della campagna di misura, inoltre, i risultati iniziali sono stati esposti durante la conferenza "*Ricerca, pianificazione e tecnologie per la corretta gestione del Territorio*" tenutasi nel Maggio 2009 a Lipari (<http://eolienews.blogspot.com>).

Consapevoli dell'importanza di una costante divulgazione delle conoscenze acquisite sul campo, questo lavoro è il secondo di una piccola serie dedicata a questo tipo di esperienza di monitoraggio mediante i sistemi laser scanner terrestri.

1. Area di studio

L'isola di Vulcano è la più meridionale del ramo Sud dell'arcipelago eoliano. Questo ramo è caratterizzato da un sistema di faglie ad andamento NNW-SSE, interpretato frequentemente come l'estensione off-shore della faglia di Tindari-Letojanni [Gasparini et al., 1995; Lanzafame e Bousquet, 1997]. Questa struttura ha un'importanza regionale in quanto ha permesso l'avanzamento verso SE dell'arco calabro-peloritano e della parte meridionale del Tirreno [Lentini et al., 1995] e separa due differenti domini geodinamici: uno occidentale caratterizzato da spessa crosta continentale e terremoti superficiale ed uno orientale caratterizzato da crosta sottile e sismicità profonda legata alla subduzione dello Ionio verso NW, al di sotto dell'arco calabro-peloritano. Recenti studi hanno riportato evidenze di compressione a Nord della costa tirrenica siciliana [Hollestein et al., 2003], mostrando la presenza di strutture compressive tra la costa e l'isola di Vulcano [Argnani et al., 2007]; anche le misure GPS sulle isole di Vulcano e Lipari sembrano dimostrare la prevalente cinematica traspressiva laterale destra che controlla la deformazione della parte più meridionale dell'arcipelago [Bonforte e Guglielmino, 2008; Mattia et al., 2008]. L'attività vulcanica più recente (negli ultimi 6000 anni) è stata localizzata principalmente nel cono della "Fossa di Vulcano". Esso si trova nella parte nord-orientale del corpo principale dell'isola; è un cono di cenere, tufi e lapilli costruito da materiale piroclastico deposto durante eruzioni succedute del passato, l'ultima delle quali è avvenuta nel 1898 [Keller et al., 1980] ed ha coperto il cono con un livello di tufo grigio/nero che oggi viene rapidamente eroso sui fianchi esterni, rimettendo a nudo i vecchi tufi più gialli. La parte interna del cratere, rilevata dal laser scanner è invece composta in maniera abbastanza uniforme da prodotti piroclastici sciolti di colore grigio/nero e di varia granulometria, da ceneri e lapilli fino a bombe/blocchi. Solo nelle parti più alte, vicine al bordo interno meridionale, affiorano testate di stratificazioni di tufi più massivi, prodotti durante eruzioni precedenti.

Il modello dell'Isola di Vulcano è mostrato nella figura 2. La vista aerea e le viste prospettiche nel sistema UTM (WGS84) lungo le direzioni est e nord (x e y) sono fornite per descriverne meglio le caratteristiche geometriche.

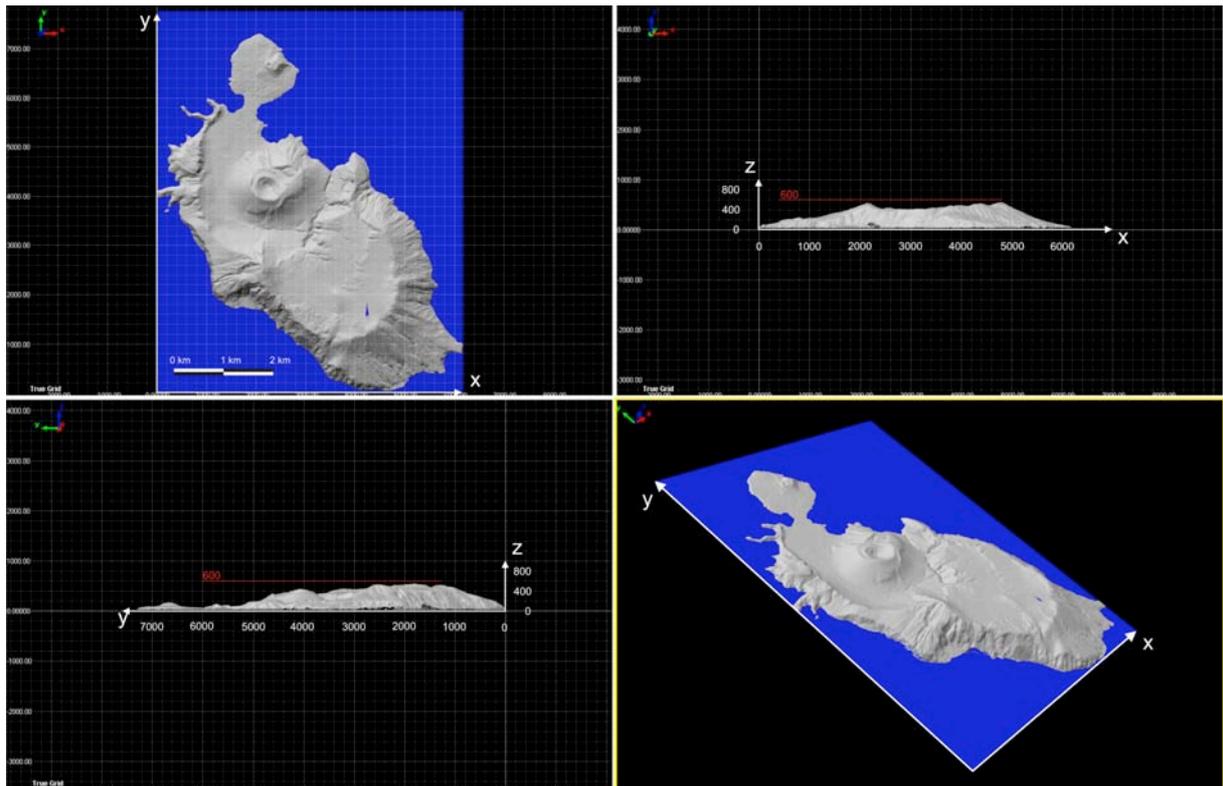


Figura 2. Il modello (DTM) dell'Isola di Vulcano ottenuto dai dati di fotogrammetria digitale relativo al volo del 1996. Immagini da elaborazione in ambiente Polyworks (modulo IMInspect).

2. Descrizione delle misure

La campagna di misura per il rilievo del cratere di Vulcano è stata realizzata nei giorni 12-13 maggio 2009. Le scansioni sono state effettuate da 6 punti distribuiti attorno alla corona del cratere, come indicato schematicamente in figura 3.



Figura 3. I punti di stazione TLS sul cratere del vulcano.

Le visuali disponibili dai punti di osservazione sono illustrate in Figura 4 e le caratteristiche principali di ogni scansione sono descritte nella tabella 1. In particolare sono elencati il numero di punti contenuti in ogni scansione, generalmente compresi tra 1 e 3 milioni, la distanza media di lavoro ed il passo di campionamento. Per chiarezza è bene sottolineare che, essendo quest'ultimo dipendente dalla distanza, alle distanze maggiori la nuvola di punti sarà inevitabilmente meno densa, influenzando quindi sul calcolo della distanza di lavoro caratteristica di ogni scansione che sarebbe meglio descritta dalla mediana. Il passo di campionamento è dato in unità adimensionali, come il multiplo intero del minimo passo possibile (c), ed in mm. La misura in mm è riferita alla distanza media. Per fare un esempio, la scan 1 è stata rilevata misurando 1487820 punti con un passo angolare 14 volte più grande del minimo consentito; il passo di campionamento a 368.96 m è 103.3 mm. Per quantificare il passo di campionamento alle varie distanze è sufficiente calcolare: $ss(mm) = 14 \cdot 0.02 \cdot R(m)$. Le scansioni delle aree rilevate sono mostrate in figura 5.

scan	1	2	3	4	5
nr punti	1487820	1285540	1927108	1517206	787158
distanza media (m)	368.96	249.47	420.3	311.37	182.04
passo x (c/mm)	14/103.3	14/69.9	14/117.7	14/87.2	29/105.6
passo y (c/mm)	14/103.3	14/69.9	14/117.7	14/87.2	29/105.6
scan	6	7	8	9	10
nr punti	2029566	2597413	2246243	1980634	1872129
distanza media (m)	234.97	379.1	370.32	377.39	236.09
passo x (c/mm)	18/84.6	14/106.1	18/133.3	18/135.9	20/94.4
passo y (c/mm)	18/84.6	14/106.1	18/133.3	18/135.9	20/94.4
scan	11	12	13	14	15
nr punti	2849608	2934882	2934882	2255330	1900848
distanza media (m)	312.05	320.39	286.61	393.96	143.43
passo x (c/mm)	14/87.4	16/102.5	16/91.7	11/86.7	10/28.7
passo y (c/mm)	14/87.4	16/102.5	16/91.7	11/86.7	10/28.7

Tabella 1. Le caratteristiche delle scansioni. Il numero totale di punti misurati; la distanza media di lavoro; il passo di campionamento lungo l'asse x e y riferito alla distanza media. Il valore c indica le unità di step angolari utilizzate, multiple del minimo passo angolare possibile ($c = 10$, indica che il passo scelto è 10 volte maggiore del minimo passo consentito).



Figura 4. Le foto scattate dai 6 punti di osservazione. È importante notare che da ogni punto di stazione sono state eseguite più scansioni ruotando lo strumento sul suo asse per acquisire l'intera area di interesse, poiché il range angolare di ogni singola scansione è 40° . La striscia colorata nella parte alta della foto scan 1 è la tesa di un sombrero: il surriscaldamento eccessivo dello strumento, infatti, potrebbe provocarne lo spegnimento automatico.

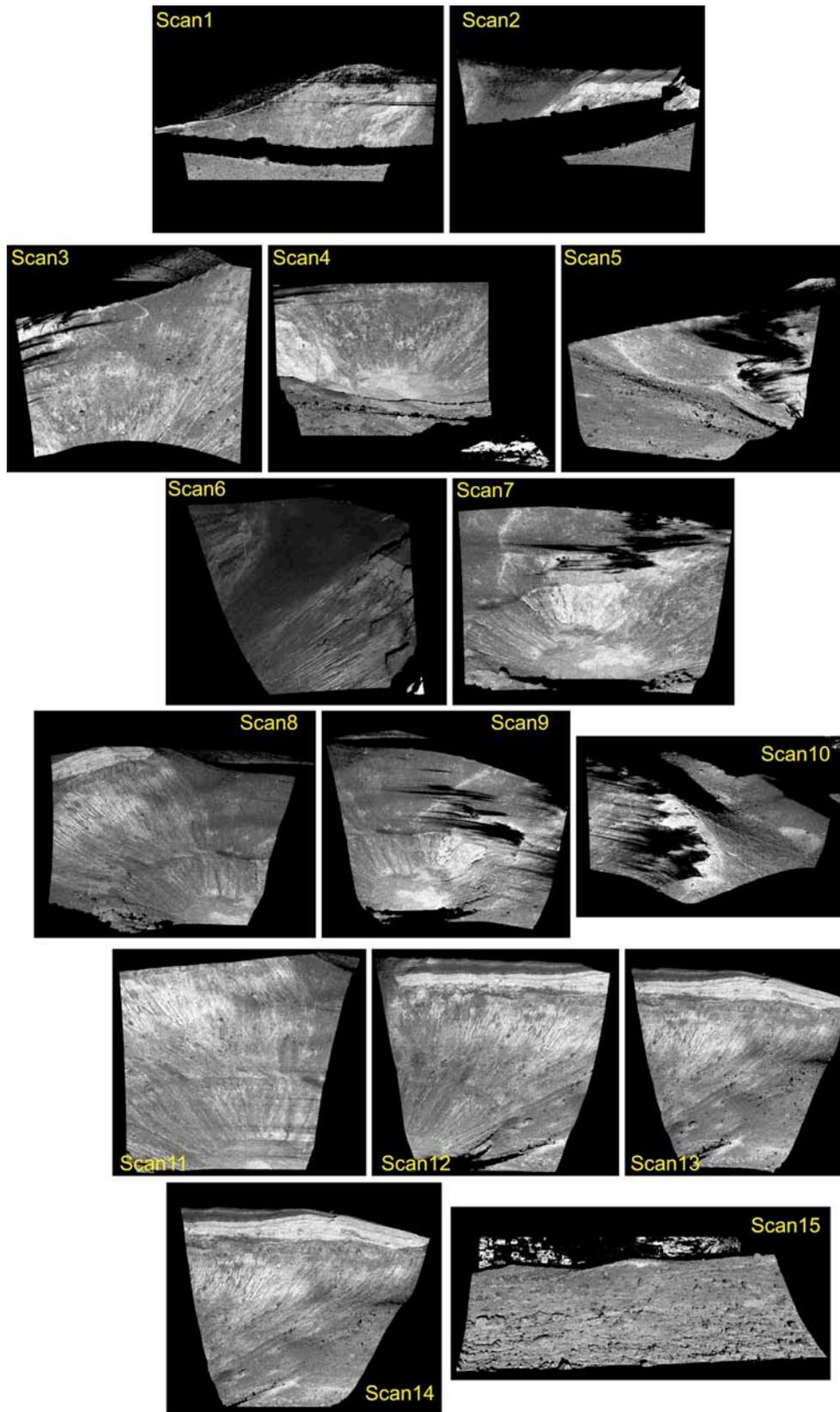


Figura 5. Le scansioni effettuate da 10 punti distribuiti lungo la corona del cratere. Il colore è l'intensità di risposta dei materiali. In particolare, la scansione 7 mostra le zone di ombra dovute all'interferenza del fumo e le scansioni 12, 13 e 14 mostrano la maggiore riflettività dei tuffi stratificati affioranti al di sotto del materiale sciolto.

Vale la pena soffermarsi sulla scansione 15 (fig. 6) per notare che oltre al pianoro settentrionale, rilevato con dettaglio, la nuvola di punti contiene anche parte del paese visibile nello sfondo.

La scansione è stata analizzata per valutare, nelle condizioni climatiche della giornata di misura, la massima distanza raggiungibile, mostrando valori fino a circa 1300 m, a conferma del carattere *long-range* (cioè ad alta portata) dello scanner utilizzato.

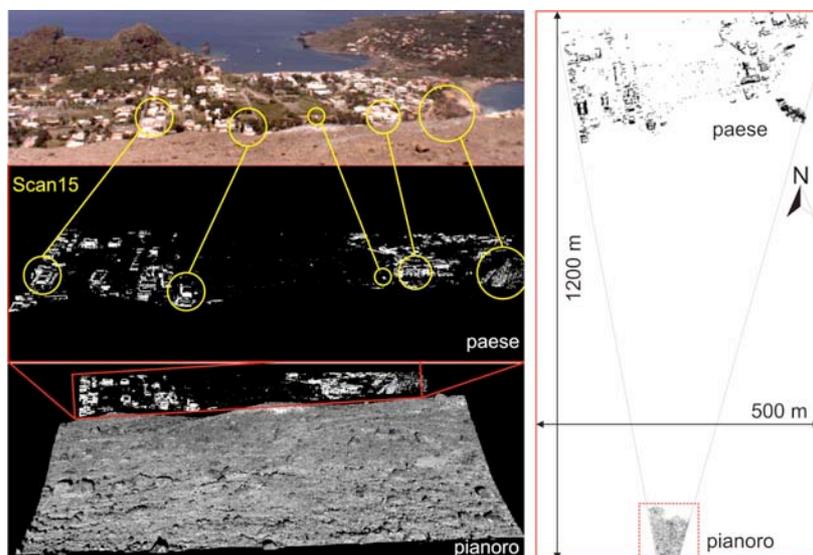


Figura 6. La scansione 15: il pianoro e le case sullo sfondo. La nuvola di punti (scan 15) è mostrata anche in pianta (riquadro a destra nella figura) in cui si può facilmente osservare che la distanza planimetrica tra il pianoro e le case più in lontananza è di circa 1200 m. La distanza in linea d'aria è calcolata in circa 1300 m. Tali misure sono in accordo con le potenzialità dello strumento dichiarate nelle tavole tecniche della casa costruttrice.

È interessante anche notare che l'importante attività fumarolica, presente durante le misure della zona alta della parete meridionale, ha creato un evidente effetto ombra. Infatti, come risulta evidente in figura 7, una consistente quantità di dati non è stata acquisita.

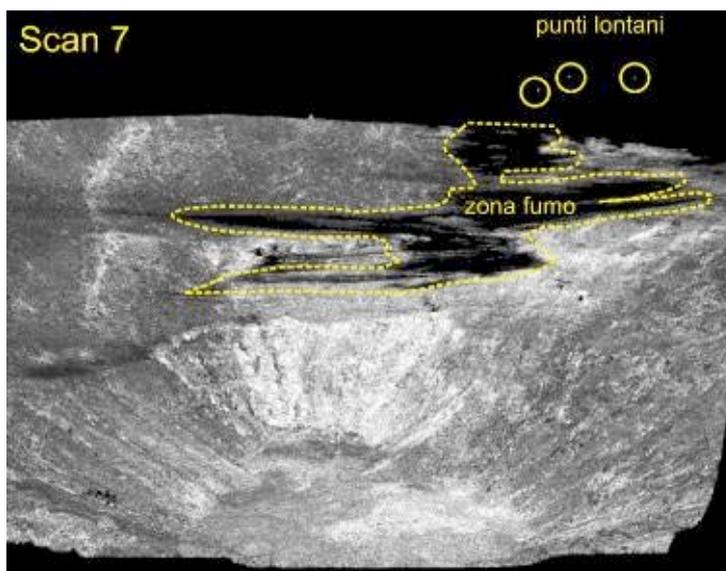


Figura 7. La nuvola di punti Scan5. Le zone di dato mancante sono evidenziate con la linea tratteggiata e nei cerchi sono indicati alcuni punti lontani ad una distanza di circa 2.3 km. (probabilmente si tratta di retro riflettori o parabole installate a Lipari).

3. Modelli

Ogni singola scansione è stata ripulita mediante operazioni di *editing manuale* (mediante l'applicazione Pifedit.exe, Polyworks) e successivamente importata nel modulo IMAlign per l'allineamento e la ricostruzione di una nuvola di punti globale, seguendo la procedura classica descritta in [Pesci et al., 2007] e nel manuale di Polyworks (<http://facility.unavco.org>).

Nella figura 6 è mostrato l'allineamento di tutte le scansioni (ad 1/4 della densità reale, per questioni di gestione dati) a ricoprire l'intero cratere.

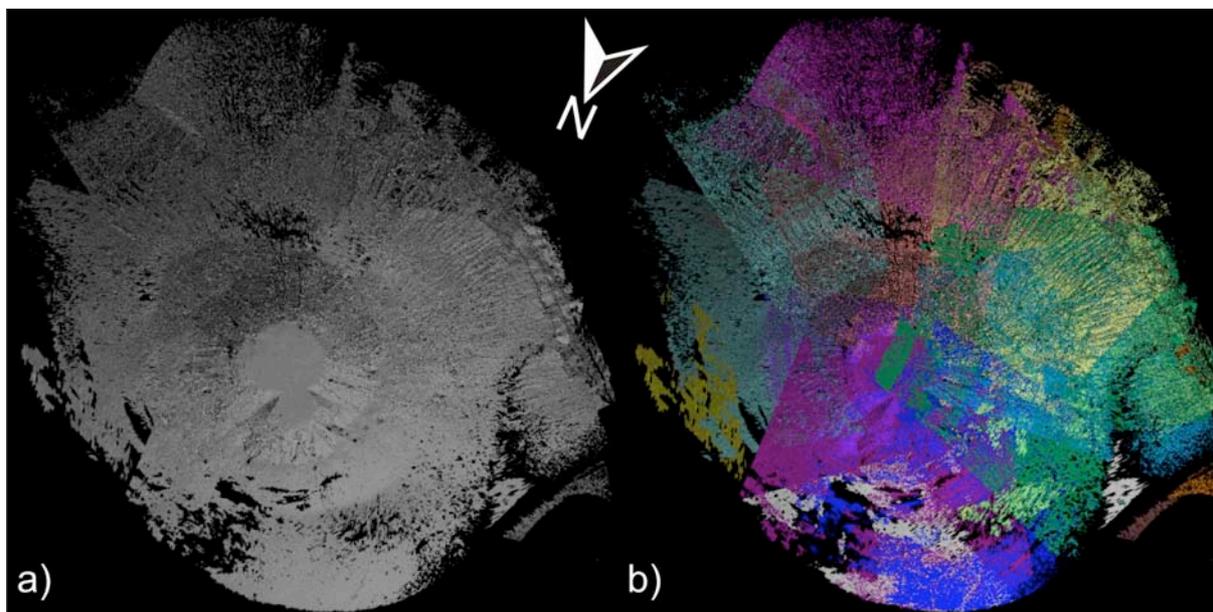


Figura 8. L'insieme totale delle scansioni, dal modulo IMAlign di Polyworks. a) Colorazione uniforme; b) colorazione per scansione.

La nuvola di punti risultante dall'allineamento di tutte le scansioni è stata successivamente ridotta eliminando, ove possibile, le zone ad alta sovrapposizione (*image reduction*) e, mediante specifici algoritmi di interpolazione (modulo IMMerge) è stato definito il modello digitale (DSM) triangolato. Nonostante la densità media delle nuvole di punti, nelle zone di massima distanza, sia di circa 10-15 cm, e nettamente inferiore (alcuni cm) nelle altre parti delle immagini, la scelta finale è stata di creare dei modelli con passo di circa 30 cm per una più semplice gestione dei dati.

Il modello TLS è stato allineato sul DTM (Digital Terrain Model) fotogrammetrico per ottenere un unico modello a scala variabile che, in questo caso, ha una precisione di 2.5 m in tutta l'isola e di 30 cm nell'area del cratere. L'integrazione è stata fatta seguendo la procedura descritta in Pesci et al. (2007): inizialmente è stata selezionata l'area comune e sono stati selezionati i punti omologhi alle due immagini; il primo allineamento (grezzo) è stato ottenuto mediante roto-traslazione e l'allineamento fine è stato raggiunto applicando gli algoritmi ICP (Iterative Closest Point) forniti nel modulo IMAlign (Polyworks).

In figura 9 è mostrata la mappa delle differenze (residui) tra il modello di riferimento, ottenuto dalla fotogrammetria digitale (2.5 m) ed il modello TLS (30 cm). La mappa mostra chiaramente due zone (giallo/rosso) di differenze positive elevate (10/20 m), probabilmente dovuta ad errori di verticalità. Infatti, i rilievi aerei permettono di ottenere una grande completezza del dato ma sono affetti da problematiche di modellazione in presenza di topografie che presentano forti verticalità, e questi forti residui sono localizzati proprio nelle zone con maggiore pendenza. Ciò dipende, ovviamente, dall'angolo di vista. La maggior parte dell'area in comune ai due modelli è caratterizzata da residui compresi tra +/- 2m, in coerenza con la risoluzione del modello aereo.

È importante notare che, nelle aree più interne, in cui le pendenze sono più regolari, i residui rappresentano con grande probabilità effetti di variazione morfologica dovuti ad erosione e frane. Tali differenze saranno valutate in seguito mediante il confronto dei modelli multi temporali in un prossimo lavoro.

Le aree comuni appartenenti al modello fotogrammetrico (e meno dense) sono state poi ritagliate ed eliminate operando direttamente sulle nuove nuvole di punti ed il modello totale è stato ricalcolato

dall'unione delle due immagini editate. Nella figura 10 è mostrato il risultato delle operazioni di integrazione che hanno portato alla definizione del modello globale a scala variabile.

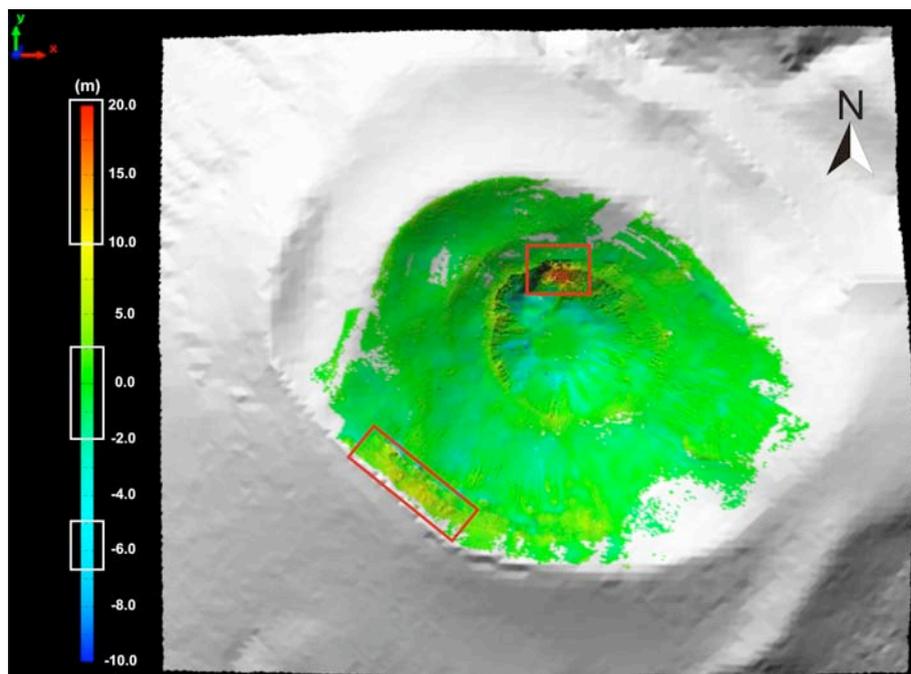


Figura 9. La mappa dei residui TLS - Fotogrammetria. Nella scala del colore sono messe in evidenza le aree che indicano valori riconosciuti nella figura: in particolare, valori dell'ordine di 10 m sono evidenziati. Non è tuttavia possibile, in prima analisi, imputare queste grandi variazioni a effettive differenze superficiali, tenendo presente che il rilievo di fotogrammetria aerea potrebbe "sbagliare" nella restituzione del modello nelle zone ad alta verticalità.

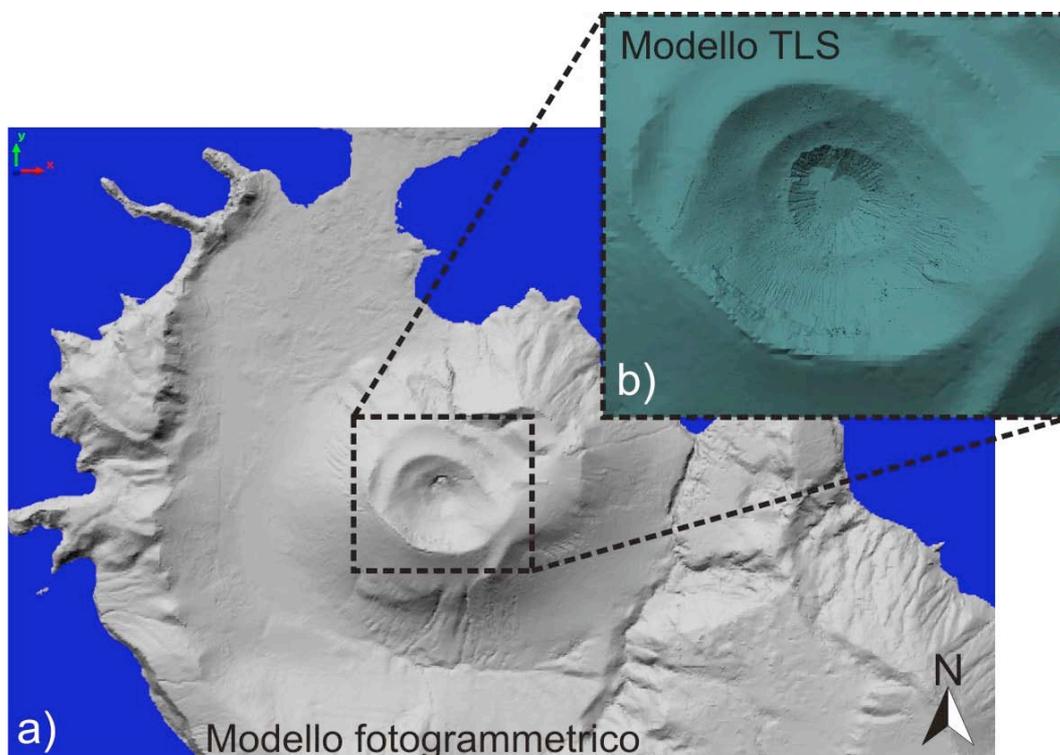


Figura 10. Il modello ottenuto dalla fotogrammetria aerea ed il modello TLS allineati per la creazione del modello completo a scala variabile.

4. Conclusioni

La prima esperienza di rilievo mediante laser scanner terrestre sull'Isola di Vulcano ha permesso, mediante il rilievo di numerose scansioni effettuate dalla corona del cratere, di ottenere un modello ad alta risoluzione con passo medio di 30 cm. Applicando le conoscenze di analisi e editing sulle nuvole di punti, è stato possibile integrare il modello TLS su un modello digitale completo dell'isola (DTM) ottenuto dalla fotogrammetria aerea.

Inoltre, l'analisi delle singole nuvole di punti, rilevate ad alta densità (da pochi cm a 10-15 cm), ha permesso di valutare gli effetti indotti dalla presenza delle fumarole e di osservare le differenti risposte in termini di riflettività correlate con i materiali presenti nel cratere. È infatti interessante notare come le zone caratterizzate dagli affioramenti dei tufi più massivi mostrino una riflettività maggiore rispetto al materiale piroclastico sciolto. Questa maggiore riflettività sembra essere legata alla maggiore compattezza del materiale oltre che forse anche a una minore "rugosità" generale che ne disperderebbe il raggio riflesso. Altra caratteristica che sembra condizionare la qualità del segnale riflesso è il colore; infatti, confrontando le scansioni con foto riprese dagli stessi punti di vista, è evidente come le zone più chiare sembrino avere una maggiore intensità del segnale riflesso, specialmente nelle zone fumarolizzate, ricoperte da sublimati chiari. Sempre nelle zone interessate dalle fumarole però, un problema è dato dalla presenza dei gas caldi emessi e dalla condensazione (vapore bianco visibile nelle foto) causata dal calore, che assorbono totalmente il raggio del laser. Questo elemento suggerisce, per i rilievi futuri, di eseguire le scansioni in condizioni atmosferiche di bassissima umidità.

Il primo rilievo del cratere rappresenta il punto di zero per l'inizio dei lavori di monitoraggio previsti dal team del TTC 1.3.

Ringraziamenti

Un grazie speciale a Giordano Teza ed Antonio Galgaro per la disponibilità delle batterie ausiliarie per il rilievo completo mediante TLS.

Bibliografia

- Argnani, A., Serpelloni, E., Bonazzi, C., (2007). Pattern of deformation around the central Aeolian islands: evidence from multichannel seismic and GPS data. *Terra Nova*, 00, 1-7.
- Barberi, F., Gandino, A., Gioncada, A., La Torre, P., Sbrana, A., Zenucchini, C., (1994). 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, 189-206.
- Bonaccorso, A., Bonforte, A., Gambino, A., (2010). Thermal expansion-contraction and slope instability of a fumarole field inferred from geodetic measurements at Vulcano. *Bull. Volcanol.* 72, 791-801.
- Bonforte, A., Guglielmino, F., (2008). Transpressive strain on the Lipari-Vulcano volcanic complex and dynamics of the "La Fossa" cone (Aeolian Islands, Sicily) revealed by GPS surveys on a dense network. *Tectonophysics*, 457, 64-70.
- De Astis, G., Kempton, P.D., Peccerillo, A., Wu, T.W., (2006). 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.
- Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S., (2009). Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (6), 522-528.
- Gasparini, C., Iannaccone, G., Scarpa, R., (1985). Fault plane solutions and seismicity of the Italian Peninsula. *Tectonophysics*, 117, 59-78.
- Hollenstein, Ch., Kahle, H-G., Geiger, A., Jenny, S., Goes, S., Giardini, D., (2003). New GPS constraints on the Africa-Eurasia plate boundary zone in southern Italy. *Geophysical Research Letter*, 30 (18), doi: 10.1029/2003GL017554.
- Iavarone, A., (2002). Laser scanner fundamentals. *Professional Surveyor*, 22. Available online at: <http://www.profsurv.com> (accessed: 18.02.2011).

- Innovmetric, (2010). Innovmetric PolyWorks software description. <http://www.innovmetric.com> (accessed: 18.02.2011).
- Keller, J, (1980). The island of Vulcano. *Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia* 36 (1), 369-414.
- Lanzafame, G, J.C., Bousquet, (1997). The Maltese escarpment and its extension from Mt. Etna to the Aeolian Islands (Sicily): importance and evolution of a lithosphere discontinuity. *Acta Vulcanologica* 9, 113-120.
- Lichti, D.D., Jamtsho, S., (2006). Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogrammetric Record*, 21 (114) 141-160.
- Mattia, M., Palano, M., Bruno, V., Cannavò, F., Bonaccorso, A., Gresta, S., (2008) Tectonic features of the Lipari–Vulcano complex (Aeolian archipelago, Italy) from 10 years (1996–2006) of GPS data. *Terra Nova*, 20, 370-377.
- OPTEC™ ILRIS-3D Operation Manual (2006). Optech Incorporated Industrial & 3D Imaging Division, 0040170/Rev A, 1-147.
- Pesci, A., Loddo, F., Conforti, D., (2007). The first terrestrial laser scanner survey OVER VESUVIUS: the high resolution model of VOLCANO crater (Napoli, Italy). *International Journal of Remote Sensing*, 28 (1), 203-219.
- Pesci, A., Fabris, M., Conforti, D., Loddo, F., Baldi, P., Anzidei, M., (2007). Integration of TLS and aerial digital photogrammetry for Vesuvio volcano modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 162, 123-138.
- Pesci, A., Teza, G., Ventura, G., (2008a). Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy), *Annals of Geophysics*, 51 (4), 633-653.
- Pesci, A., Teza, G., (2008b). Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach. *Annals of Geophysics*, 51, 839-848.
- Pesci, A., Casula, G., Loddo, F., Bianchi, M.G., Teza, G., (2009). OPTECH™ ILRIS-3D TERRESTRIAL LASER SCANNER: SHORT USER GUIDE, INGV Rapporto Tecnico nr. 109.
- Pesci A., Teza, G., Casula, G., Loddo, F., De Martino, P., Dolce, M., Obrizzo, F., Pingue, F., (2011a). Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: Characterization of overall geometry and recognition of landslide events, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 327-336.
- Pesci, A., G., Teza, E., Bonali, (2011b). Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization. *Remote Sensing* 3, 167-184; doi:10.3390/rs3010167

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