ISSN 1724-4285

Geoitalia

N° 34 – Aprile 2011

Spedizione in abbonamento postale Art. 2, Comma 20 c, Legge 662/96 – Livorno

Analisi multi temporale (2006-2010) di dati LiDAR sulla frana attiva di Montaguto (Avellino)

CARLO TERRANOVA[1], GIUSEPPE VILARDO[2], ELIANA BELLUCCI SESSA[2], MASSIMILIANO PEPE[3], GUIDO VENTURA[2]

1 Geologo, Consulente in applicazioni di Telerilevamento
2 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Osservatorio Vesuviano, Napoli
3 Nuova Avioriprese Srl, Napoli

Figura 1. Vista prospettica 3D ricostruita da DTM LiDAR 2010 e Ortofoto digitale 2010.

Il LiDAR

Il LiDAR (Light Detection And Ranging) è una tecnica di telerilevamento di tipo attivo basata su tecnologia laser che utilizza la porzione del vicino infrarosso dello spettro elettromagnetico (1064 nm) per l'acquisizione di dati morfo-altimetrici del territorio.

L'utilizzo di tale tecnica consente di ottenere particolari rappresentazioni dei fenomeni geomorfologici e territoriali attraverso risoluzioni spaziali molto elevate realizzabili anche in condizioni proibitive di ripresa per le tecniche di telerilevamento passivo (ombre, intensità ed inclinazione dell'illuminazione solare, foschie, etc.), con la possibilità di operare giorno e notte.

La principale peculiarità del LiDAR è l'altissima velocità di acquisizione dati che, abbinata ad una elevata precisione nella misura altimetrica e nella distribuzione planimetrica dei punti di misura, consente una risoluzione verticale di tipo decimetrico, in relazione alla morfologia ed alla complessità territoriale della superficie indagata, ed una risoluzione orizzontale, anch'essa decimetrica, legata alla frequenza di emissione degli impulsi ed alla loro densità sul terreno (n. di impulsi per m^2).

Per queste ragioni, il LiDAR è generalmente utilizzato: da aereo, per la produzione di modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione o di rendering 3D di aree urbane, e da terra per il rilevamento tridimensionale di manufatti, di versanti o fronti di cava e pertanto utilizzato in differenti settori di applicazione quali geologia, ingegneria, architettura ed archeologia.

Nell'ambito del monitoraggio di frane attive, il LiDAR da piattaforma aerea è stato utilizzato negli ultimi anni con lo scopo di produrre DTM dei corpi in movimento (es. McKenna et al., 2008).

Il confronto tra DTM acquisiti in periodi differenti consente infatti di identificare le aree soggette ad abbassamento o sollevamento, di stimare la velocità delle deformazioni verticali e, in alcuni casi, di determinare le velocità delle deformazioni orizzontali (DeWitte et al., 2008) rappresentando la tecnologia di monitoraggio più idonea nel caso di estesi fenomeni gravitativi lenti di tipo attivo.

Studi di monitoraggio basati sull'analisi temporale di più rilievi LiDAR su corpi di frana sono tuttavia rari e generalmente basati su due singole acquisizioni, tipicamente pre e post evento. L'analisi multitemporale realizzata tramite post-processamento di dati LiDAR da aereo acquisiti da quattro missioni di volo effettuate nel periodo 2006-2010 sulla frana attiva di Montaguto AV (Figura 1) ha messo in evidenza la complessità del movimento e dei meccanismi di scorrimento/scivolamento della frana.

La frana di Montaguto

La frana di Montaguto (Avellino) ha una lunghezza di oltre 3 km distribuita su 48 ettari ed una superficie di scorrimento in profondità variabile dai 5 ai 20 metri, con litologie coinvolte costituite da livelli calcarenitici e marne nella parte alta e da argille sabbiose nel corpo principale.

Il movimento gravitativo, come evidenziato da osservazioni multitemporali di ortofoto aeree da archivio, ha avuto inizio tra il 2003 ed il 2004, in un'area a prevalente uso agricolo del suolo.

Gli iniziali scorrimenti rotazionali dei banchi calcarenitici, affioranti nella parte sommitale, hanno mobilizzato nel corso degli anni i depositi argillo-sabbiosi presenti nella sottostante valle generando un imponente flusso di fango e detriti, sviluppato anche a seguito delle variate condizioni di deflusso delle acque superficiali e sub-superficiali.

La massa franosa, che con le dovute differenze di temperatura e viscosità presenta caratteristiche simili a quelle di un flusso lavico, si è incanalata lungo un impluvio controllato da evidenti lineazioni morfostrutturali raggiungendo progressivamente il bacino del fiume Cervaro e compromettendo la funzionalità e la sicurezza di importanti infrastrutture stradali e ferroviarie utilizzate per il collegamento tra costa tirrenica ed adriatica (Corridoio Europeo n. 8).

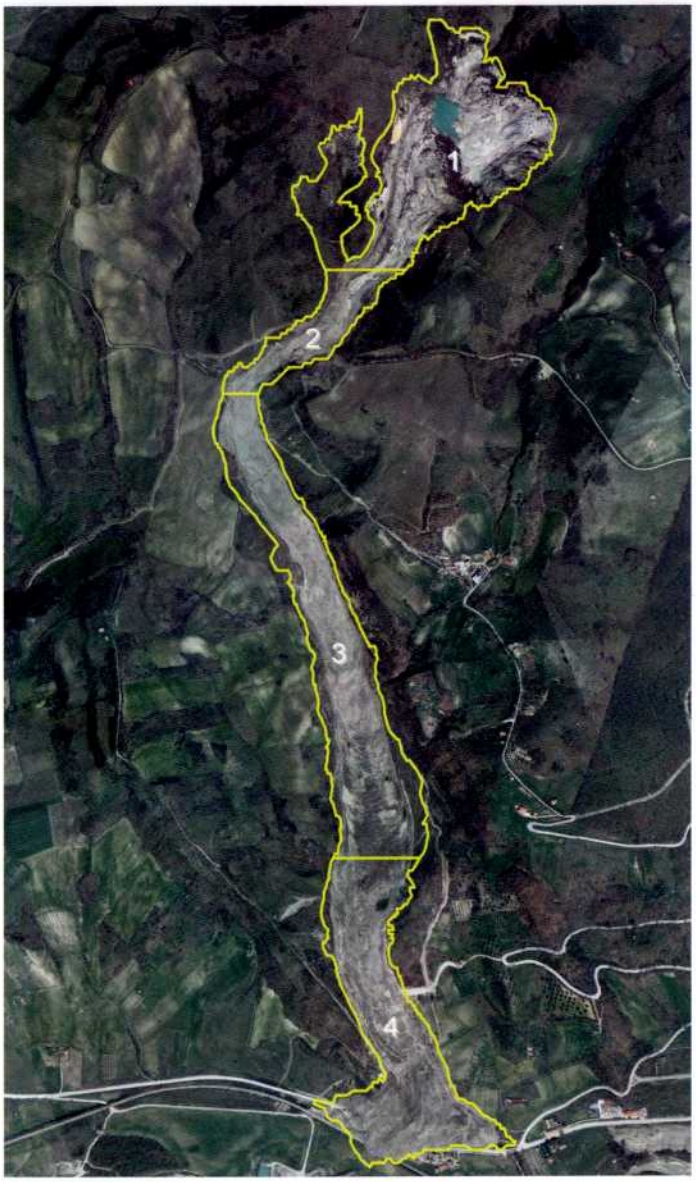

Figura 2. Ortofoto aerea 2010 della frana di Montaguto con le 4 zone identificate dall'analisi dei dati LiDAR. In basso è evidente l'invasione della sede stradale e ferroviaria da parte del cumulo di frana

La SS 90 e la linea ferroviaria Benevento-Foggia sono state interrotte per alcuni mesi nel 2010 (Figura 2), e successivamente riaperte dopo interventi di messa in sicurezza coordinati dal Dipartimento di Protezione Civile, di cui alcuni tuttora in fase di completamento.

Gli interventi effettuati, oltre che la rimozione dell'accumulo di frana, la raccolta e l'allontanamento delle acque superficiali ed il ripristino delle funzionalità viarie e ferroviarie, hanno anche previsto attività di monitoraggio diretto ed in continuo del movimento di massa tramite stazioni topografiche totali a controllo della testata (nicchia principale) e del fronte sinistro e destro del piede, coadiuvate da un sistema radar interferometrico terrestre per l'osservazione della conoide detritica.

Tale sistema di monitoraggio è stato concepito e realizzato al duplice scopo di valutare la decelerazione dei movimenti a seguito dei drenaggi effettuati e di operare un controllo costante dei livelli di sicurezza a cui risultavano sottoposti il personale ed i macchinari impegnati nelle attività di rimozione e modellazione del cumulo al piede della frana.

Con l'obiettivo di identificare ulteriori parametri utili allo studio ed al monitoraggio del fenomeno franoso il nostro gruppo di ricerca ha effettuato un'analisi multitemporale dell'attività della frana di Montaguto utilizzando rilievi aerei LiDAR eseguiti tra gli anni 2006 e 2010.

Acquisizione e pre processamento dei dati LIDAR

Per l'acquisizione dei dati LiDAR la Nuova Avioriprese Srl ha utilizzato un sensore aereo con frequenza di 150 Khz e precisione inferiore ai 15 cm in altimetria montato a bordo di un velivolo bimotore ad ala fissa Partenavia P68.

Le missioni di volo LiDAR sull'area di frana sono state complessivamente quattro (maggio 2006, luglio 2009, aprile 2010 e giugno 2010), accompagnate da concomitanti campagne di appoggio GPS e da una missione aerea con camera aerofotogrammetrica digitale.

In tutte le missioni LiDAR è stato utilizzato lo stesso punto trigonometrico della rete geodetica nazionale IGMI quale riferimento geografico per la correzione differenziale dei valori GPS acquisiti in volo.

In ogni missione, l'area della frana è stata ricoperta da 12 strisciate con un ricoprimento laterale superiore al 20% e con una densità minima di tre punti per m^2.

L'insieme di punti georeferenziati ottenuti da ognuna delle quatto missioni LiDAR è stato successivamente pre-processato dalla Nuova Avioriprese Srl utilizzando specifici software per la classificazione dei dati finalizzata all'estrazione dei punti "terreno" da utilizzare per la generazione dei DTM.

A tal fine, la prima fase del processamento dei dati ha previsto la rimozione in modo interattivo degli errori, cioè dei punti che si discostavano in modo anomalo dalla superficie media della scena ripresa.

I quattro dataset sono stati successivamente classificati in modalità semiautomatica tramite filtraggio dei punti ed interpolati al fine di produrre Modelli Digitali della Superficie (DSM, Digital Surface Model), in cui sono rappresentati tutti gli elementi della scena (edifici, infrastrutture, vegetazione, etc.) e Modelli Digitali del Terreno (DTM, Digital Terrain Model) rappresentativi dell'altimetria e della morfologia della superficie topografica depurata dagli elementi territoriali (Figura 3).

La densità minima di campionamento spaziale di tre punti per m^2 ha consentito, al termine della fase di pre-processamento dei dati, di generare modelli digitali del terreno (DTM) con risoluzione al suolo di 1 metro.

Post processamento dei dati LIDAR e risultati dell'analisi multitemporale

I dati LIDAR acquisiti nelle differenti missioni sono stati sottoposti a post-processamento tematico presso il Laboratorio di Geomatica e Cartografia dell'INGV-OV, realizzando le seguenti elaborazioni per ogni DTM prodotto: rilievo ombreggiato, pendenze, curvatura tangenziale e del profilo, indice di rugosità, analisi delle variazioni delle ampiezze spettrali della superficie topografica residua, immagini anaglifiche e viste prospettiche 3D.

Le differenti rappresentazioni tematiche derivate dai DTM LiDAR (2006 - 2010), unitamente all'uso di aerofotogrammi anaglifici ed ortofoto digitali (dal 1953 al 2010), sono state utilizzate per l'analisi fotointerpretativa dell'area interessata dalla frana.

Ciò ha consentito di perimetrare la superficie topografica coinvolta, di identificare fenomeni precursori del movimento gravitativo (creep, trenches, erosione del suolo, etc.) e di evidenziare nel tempo l'evoluzione delle modificazioni della morfologia, del reticolo idrografico e di altri elementi territoriali quali ad esempio: effetti della meccanizzazione delle pratiche agricole, incremento della viabilità agro-silvo pastorale, sviluppo di impianti eolici sui crinali.

In particolare, l'analisi congiunta delle pendenze, dell'indice di rugosità (rapporto tra superficie esposta e superficie sottesa) e di ulteriori tematismi derivati da filtraggi spaziali e rappresentativi delle asperità del terreno ha consentito di identificare quattro diversi settori del corpo di frana (Figura 2) contraddistinti da differenti caratteristiche morfologiche.

Tale classificazione è stata successivamente avvalorata dai risultati dell'analisi morfometrica quantitativa che ha evidenziato come tali settori siano caratterizzati da differenti distribuzioni

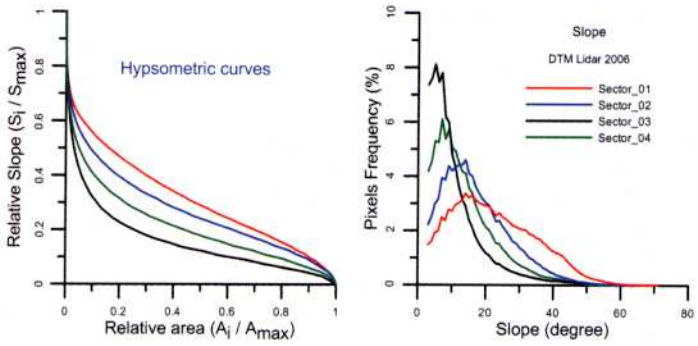

Figura 4. Parametrizzazione delle pendenze. Curve ipsometriche (destra) e distribuzione delle frequenze (sinistra) dei valori di pendenza del pendio relativi ai settori mostrati in Figura 2.

dei parametri morfometrici tra i quali: curve ipsometriche e distribuzioni in frequenza dell'acclività (Figura 4) e della rugosità superficiale (Figura 5).

Un'ulteriore parametrizzazione della superficie interessata dal fenomeno franoso è stata realizzata sulla base dell'analisi delle variazioni delle ampiezze spettrali della superficie topografica residua, calcolate lungo profili altimetrici longitudinali al corpo di frana (Figura 6).

L'analisi ha previsto la rimozione dell'andamento medio della topografia del terreno dai profili altimetrici ed il calcolo degli spettogrammi dei residui topografici così ottenuti.

Il risultato dell'applicazione di tale tecnica, ampiamente usata in sismologia per la caratterizzazione spettrale dei segnali sismici nel tempo, fornisce una significativa rappresentazione grafica (Figura 7) dell'ampiezza delle ondulazioni del terreno in funzione dello spazio (distanza lungo il profilo) e delle frequenze caratteristiche delle ondulazioni stesse.

I DTM LiDAR sono stati elaborati congiuntamente per valutare le differenze altimetriche prodotte sulla superficie dal movi-

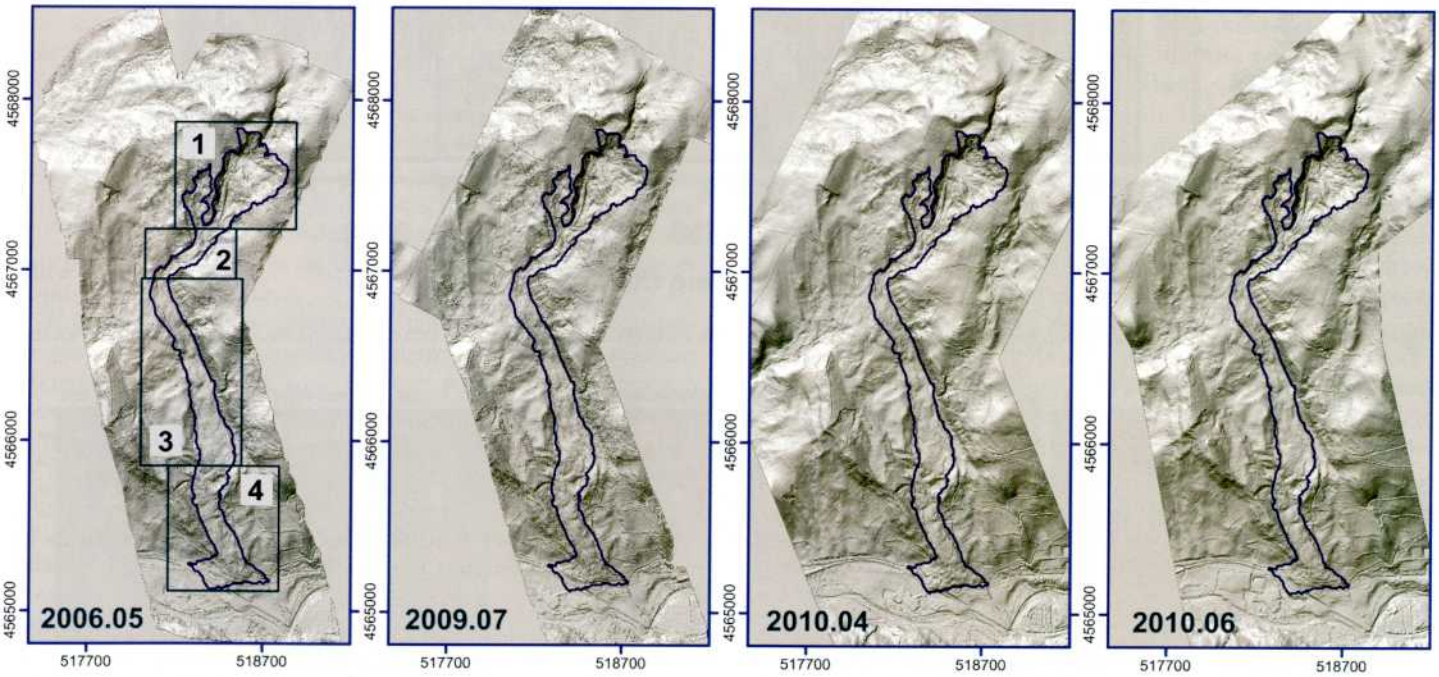

Figura 3. Serie multitemporale dei rilievi ombreggiati da dati LIDAR. Le aree numerate a sinistra suddividono il corpo di frana in settori caratterizzati da differenti caratteristiche morfometriche. L'area poligonale rappresenta l'estensione planimetrica totale dell'area interessata dal fenomeno franoso nel corso degli anni.

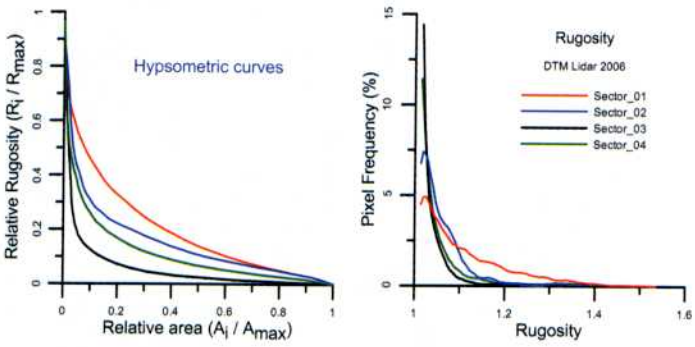

Figura 5. Parametrizzazione della rugosità. Curve ipsometriche (destra) e distribuzione delle frequenze (sinistra) dei valori di rugosità superficiale relativi ai settori mostrati in Figura 2.

mento di frana e per calcolare i volumi della massa coinvolta nel tempo.

Sulla base della valutazione delle differenze altimetriche tra coppie di DTM LiDAR successivi nel tempo è stata effettuata una stima dei volumi, in eccesso o in difetto, relativi all'intera superficie interessata dal fenomeno franoso (Figura 8).

Al fine di aumentare la percezione dell'entità del movimento gravitativo e delle modificazioni morfotopografiche avvenute nel corso degli ultimi 12 anni è stato utilizzato un DTM pre-evento prodotto dai dati altimetrici vettoriali della CTR 1998 della Regione Campania in scala 1:5.000 che, pur presentando differenze nell'accuratezza plano-altimetrica, permette di evidenziare le complessive modificazioni generate dalla frana (Figura 8 a,e).

I DTM LiDAR sono stati infine utilizzati per la creazione di viste prospettiche 3D gestite interattivamente su un sistema dinamico di visualizzazione che ha permesso l'esplorazione virtuale della morfologia anche attraverso la sovrapposizione di ortofoto ad alta risoluzione e di rappresentazioni tematiche prodotte dal complessivo post-processamento.

La realizzazione di sequenze multi-temporali 3D, gestite in modalità dinamica, ha permesso un'aumentata percezione nelle osservazioni e misurazioni dei fenomeni geomorfologici (creep, trenches, subsidenze e rigonfiamenti del suolo, etc.) generati dal movimento gravitativo e degli elementi morfostrutturali coinvolti (lineazioni, scarpate, etc.).

Le Figure 9 e 10 rappresentano esempi di immagini tematiche 3D (DTM + Differenze altimetriche) estratte dal sistema di visualizzazione dei dati, rispettivamente del fronte di frana e della nicchia di distacco o di primo movimento.

La Figura 9 evidenzia l'evoluzione del fronte di frana che ha progressivamente invaso la sede stradale e quella ferroviaria provocandone l'interruzione.

Nelle Figure 9c e 9f sono evidenti gli effetti morfologici (terrazzamenti) dei due distinti interventi realizzati sul fronte di frana nel luglio 2009 e nel giugno 2010, finalizzati alla rimozione del cumulo ed al ripristino della viabilità.

Nella Figura 10 sono visibili gli effetti morfologici degli scorrimenti rotazionali che interessano i livelli calcarenitici nell'area di nicchia, con la formazione di contropendenze (laghetto sommitale) e la progressiva evoluzione del cumulo di detriti in flusso di argille sature.

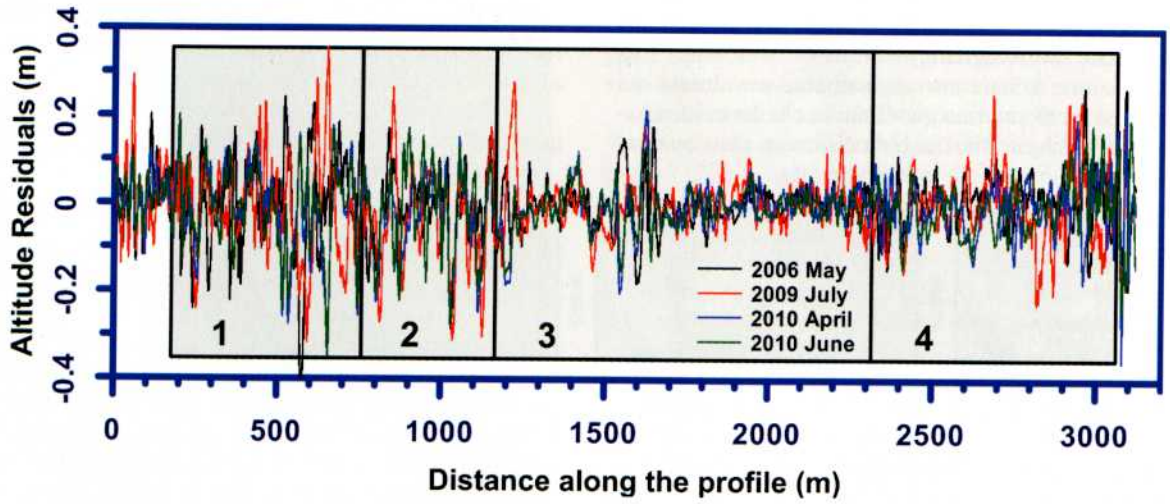

Figura 6. Residui topografici calcolati lungo profili tracciati longitudinalmente allo sviluppo del corpo di frana, con indicazione dei settori mostrati in Figura 2.

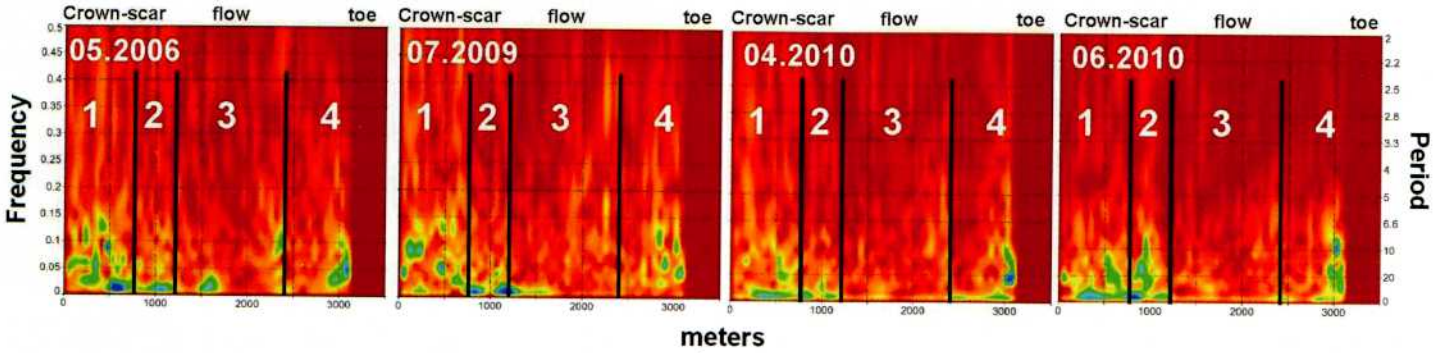

Figura 7. Spettrogrammi dei residui topografici mostrati in figura 5.

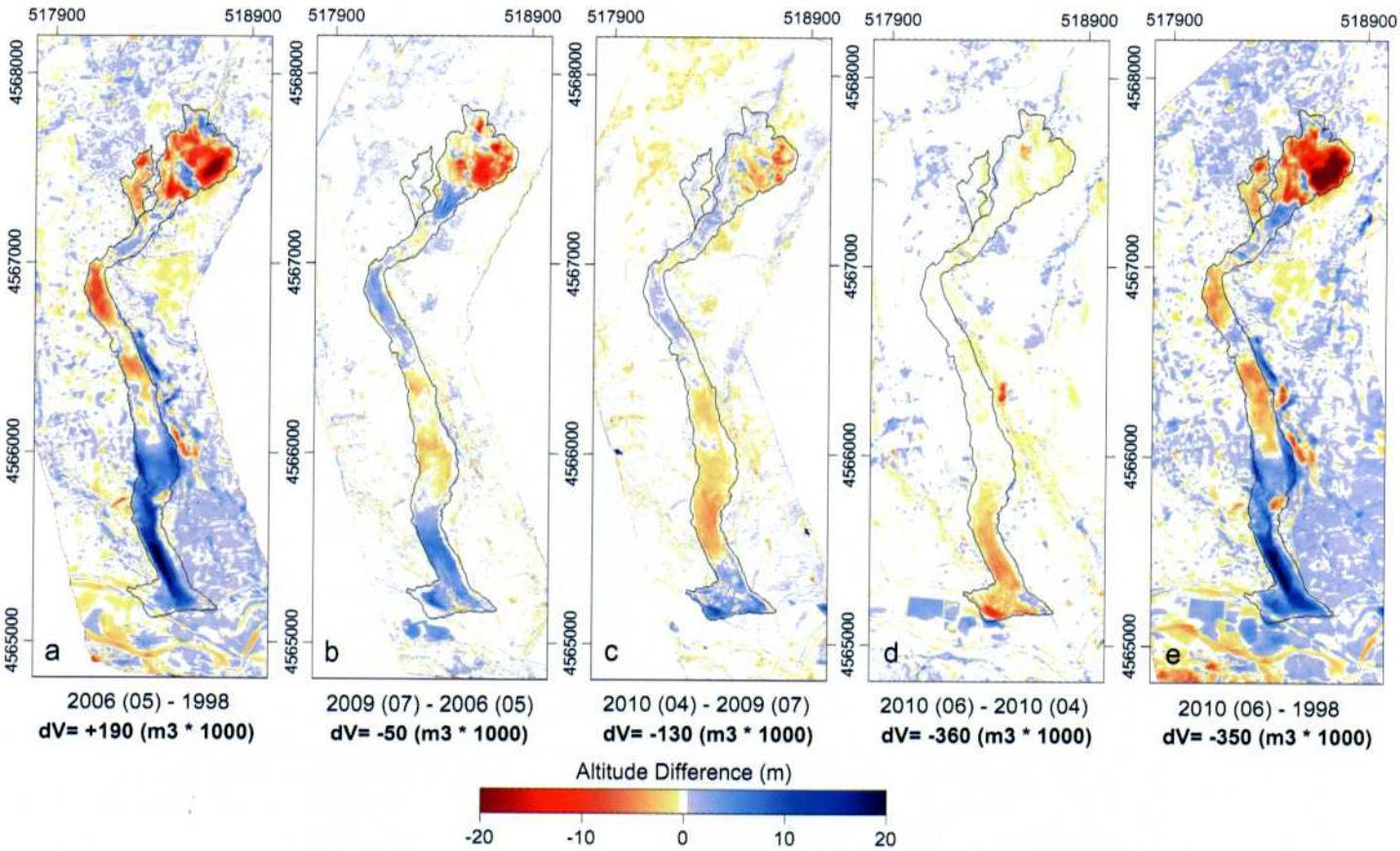

Figura 8. Variazioni altimetriche (valori positivi = accumulo; valori negativi = erosione) e stima dei volumi in eccesso (dV positivo) o in difetto (dV negativi) calcolati tra coppie temporalmente contigue di modelli altimetrici LIDAR (b – d); in a ed e sono mostrati rispettivamente le variazioni altimetriche calcolate tra DTM LiDAR 2006 e DTM CTR 1998 e tra DTM LiDAR giugno 2010 e DTM CTR 1998.

Osservazioni e considerazioni conclusive

Il riconoscimento e la parametrizzazione di morfologie riconducibili a specifiche caratteristiche del fenomeno franoso sono state evidenziate tramite la produzione ed analisi di mappe tematiche multi-temporali da elaborazione dei dati LiDAR.

I risultati riassunti nelle Figure 3-10 mostrano chiaramente la complessità del movimento e dei meccanismi di scorrimento/scivolamento. I dati LiDAR multitemporali in Figura 3 evidenziano un'area sommitale (zona 1 area di coronamento) caratterizzata da prevalenti fenomeni di distacco su pareti con pendenze >40° (Figura 10), in cui i valori di rugosità e pendenza evidenziati nelle Figure 4 e 5 sono consistenti con fenomenologie di crollo e di flusso granulare.

È interessante notare come, nel tempo, la zona 1 sia stata sempre attiva ed interessata da subsidenza, mentre nelle zone 2 e 3 (aree di transizione) si sono alternati periodi di subsidenza e periodi di sollevamento della superficie morfologica indicativi di un flusso attivo.

Le zone 2 e 3 sono inoltre caratterizzate da prevalenti flussi complessi (earth/clay flow) con fenomeni di scorrimento responsabili della formazione di argini laterali (zona 2) e di pieghe (zona 3) presenti anche nella parte sommitale della zona 4.

Tali evidenze suggeriscono un tipo di flusso con reologia complessa (fluido Bingham), molto simile ai flussi lavici in cui ad un minimo aumento della pendenza nella superficie di scorrimento non corrisponde una immediata accelerazione della massa in movimento.

La zona 4 (piede o fronte di frana) è l'area di accumulo, caratterizzata dalla formazione di una imponente conoide allo sbocco della valle del fiume Cervaro (Figura 9) in cui si accumula la massa in movimento.

La superficie topografica residua della frana è caratterizzata da una morfologia relativamente accidentata nelle zone 1 e 4 (Figure 6 e 7), con frequenze prevalenti <1 m^{-1}, mentre nella zona 3 (area di transizione), a partire dal 2009, la topografia risulta meno accidentata con assenza di frequenze prevalenti.

L'analisi delle ampiezze spettrali della superficie topografica residua evidenzia inoltre che dal 2006 al 2009 la zona 4 è stata prevalentemente un'area di accumulo, escludendo locali fenomeni di subsidenza rilevabili nel 2010 ed imputabili ai lavori di rimozione (asportazione di detriti), rimodellamento del fronte (gradonatura del cumulo) e drenaggio artificiale che hanno probabilmente indotto una deflazione del basamento della conoide.

La stima dei volumi rimossi (o accumulati) nei diversi intervalli temporali indica un generale deficit di materiale dal 2006 al 2010. Tale deficit è il risultato dell'azione combinata di fenomeni di scorrimento e flusso nelle zone 2-3, di crollo nella zona 1, dei lavori di drenaggio condotti nelle zone 2 e 3, e di terrazzamento artificiale nella zona 4.

Nel complesso, tra il 1998 e il giugno 2010, il deficit volumetrico è stimabile in circa 3.5 10^5 m^3, con un tasso medio di volume rimosso di 2.9 10^4 m^3/anno, mentre tra aprile e giugno 2010, il volume rimosso è stato di 3.6 10^5 m^3, con un tasso di 1.8 10^5 m^3/mese.

Concludendo, i risultati dell'analisi multi-temporale LiDAR della frana di Montaguto hanno consentito, oltre ad una stima dei

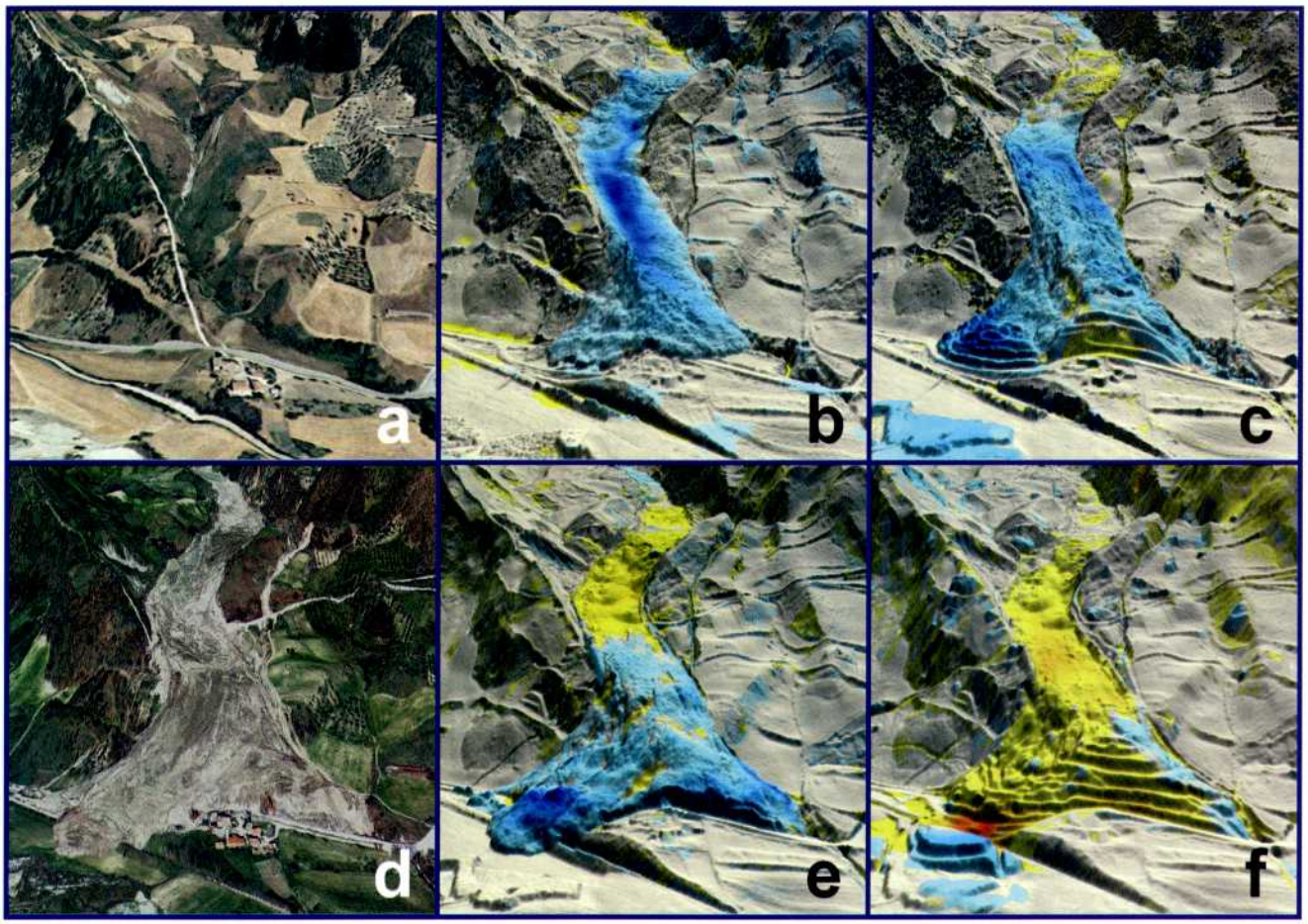

Figura 9. Viste prospettiche del fronte del movimento franoso (con esagerazione verticale 3 e direzione della linea di vista a 350°N) - a) ortofoto 1998 sovrapposta a DTM 1998; b) differenza altimetrica 2006 -1998 sovrapposta a DTM 2006; c) differenza altimetrica 2009 -2006 sovrapposta a DTM 2009; d) ortofoto 2010 sovrapposta a DTM aprile 2010; e) differenza altimetrica aprile 2010 - 2009 sovrapposta a DTM aprile 2010; f) differenza altimetrica aprile 2010 -giugno 2010 sovrapposta a DTM giugno 2010. I valori di variazione altimetrica sono rappresentati in scala cromatica cha varia dalle tonalità del blu (valori positivi = accumulo) a quelle del rosso (valori negativi = erosione).

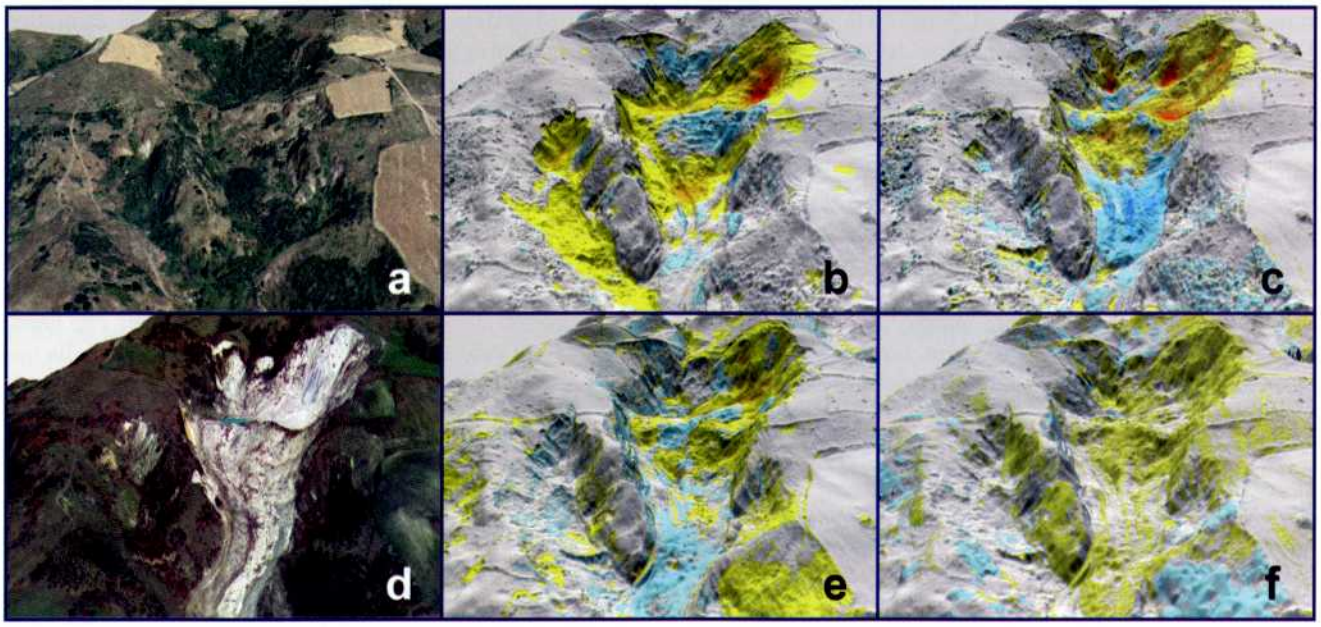

Figura 10. Viste prospettiche dell'area di distacco (con esagerazione verticale 2 e direzione della linea di vista 25° N) - a) ortofoto 1998 sovrapposta a DTM 1998; b) differenza altimetrica DTM 2006 - DTM 1998 sovrapposta a DTM 2006; c) differenza altimetrica DTM 2009 - DTM 2006 sovrapposta a DTM 2009; d) ortofoto 2010 sovrapposta a DTM aprile 2010; e) differenza altimetrica DTM 2010 aprile - DTM 2009 sovrapposta a DTM aprile 2010; f) differenza altimetrica DTM aprile 2010 - DTM giugno 2010 sovrapposta a DTM giugno 2010. I valori di variazione altimetrica sono rappresentati in scala cromatica cha varia dalle tonalità del blu (valori positivi = accumulo) a quelle del rosso (valori negativi = erosione).

volumi coinvolti nel movimento di massa, di parametrizzare l'evoluzione topografica e morfometrica della frana, di distinguere zone caratterizzate da differenti meccanismi di movimento/flusso e di evidenziare gli effetti dovuti a fenomeni naturali ed antropici compresi gli interventi di messa in sicurezza.

I risultati ottenuti dall'approccio analitico e metodologico basato sul post processamento di dati LiDAR multitemporali confermano che tale tecnica di telerilevamento risulta essere particolarmente idonea per lo studio ed il monitoraggio di frane complesse e/o flussi gravitativi (es. debris-flow) di tipo attivo che presentano ampia estensione geografica dei fenomeni.

La tecnologia LiDAR da aereo nei suoi complessivi aspetti di acquisizione, pre e post- processamento realizzati secondo approcci multi temporali è inoltre in grado di operare con successo nell'identificazione preventiva dei fenomeni precursori di frane che possono negativamente coinvolgere infrastrutture di trasporto strategiche, aree urbanizzate ed impianti industriali.

Riferimenti bibliografici

Dewitte O., Jasselette J.-C., Cornet Y., Van Den Eeckhaut M., Collignon A., Poesen J., Demoulin A., 2008. Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: A combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. Engineering Geology, 99, 11-22; doi: 10.1016/j.enggeo.2008.02.006.

Marsella M., Baldi P., Coltelli M., Fabris M., Proietti C., Terranova C., Ventura G., Vilardo G. (2005), Generation and analysis of LiDAR and photogrammetric DEMs in active volcanic areas ESA Workshop "Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenetic Areas", Napoli, 23/ 24 Giugno 2005 Abstracts Volume,62.

McKenna, J.P., Lidke, D.J., Coe, J.A., 2008, Landslides mapped from LIDAR imagery, Kitsap County, Washington: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007–1292, 81 p. (http://pubs.usgs.gov/of/2008/1292/)

Ventura G., Vilardo G. (2008). Emplacement mechanism of gravity flows inferred from high resolution Lidar data: The 1944 Somma–Vesuvius lava flow (Italy). Geomorphology, 95 (3-4), 223-235, doi: 10.1016/j.geomorph.2007.06.005.

Vilardo G., Ventura G., Terranova C., Marsella M. 2005 Rilievo laser scanner dell'area craterica del Vesuvio 9a Conferenza Nazionale ASITA, 15 - 18 novembre 2005, Catania, Vol. 2, 2011-2016.

doi: 10.1474/Geoitalia-34-12