

# PRIMI RISULTATI GEOMORFOLOGICI DA STRISCIATE LASER SCANNING DELLA FRANA DEL PASSO DELLA MORTE

Giancarlo MASSARI, Michele POTLECA, Nicola STEFANELLI

Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia  
via Natisone 43, Palmanova, Italia

## Riassunto

Per la comprensione ed il monitoraggio di fenomeni franosi di grandi dimensioni e di difficile perimetrabilità si stanno sperimentando analisi multitemporali con tecnica laserscannig da piattaforma aerea.

Scopo e campo di applicazione del progetto, oltre che l'acquisizione e la modellazione della superficie rilevata, è il confronto multitemporale di DTM al fine di determinare correttamente i movimenti del dissesto in atto.

Il sistema permette l'acquisizione di una doppia eco misurando il tempo di arrivo della prima e dell'ultima riflessione dell'impulso laser infrarosso.

Dalle analisi del "ground" del primo rilievo si sono rilevati particolari geomorfologici assolutamente non osservabili sia dalla carta tecnica regionale che dalle analisi di fotografie aeree.

## Abstract

We are testing multitemporal analyses from aerial laser scanning data, in order to analyse and monitor and comprehend wide dimension and difficult perimetrated landslides.

The final goal of this project is not only acquiring and modelling the terrain surface, but also a multitemporal comparing of different DTMs, in order to correctly determine the development of the event. The aerial laser scanning is based on the acquisition of a double eco which comes from the first and the last pulse of an infrared laser beam.

Analyzing the last pulse (the "ground" one) of our first air flight, we have observed some geomorphic features never seen on the regional technical map (CTRN) nor on aerial photos.

## Introduzione

Un tratto dell'alta valle del fiume Tagliamento è interessato da un movimento franoso di rilevanti dimensioni che si sviluppa in sinistra idrografica in corrispondenza del "Passo della Morte" (fig. 1), in comune di Forni di Sopra (provincia di Udine).

Il dissesto si è manifestato in superficie prima con lenti ma continui cedimenti della sede stradale (SS 52 Carnica), poi con lesioni della volta della galleria in fase di costruzione da parte dell'ANAS, il cui completamento ha subito notevolissimi ritardi ed a tutt'oggi appare fortemente pregiudicato.

La gravità del fenomeno, venutosi a determinare per la parziale e recente riattivazione di un'antica paleofrana, ha indotto la Direzione regionale della Protezione Civile ad impegnarsi, con la collaborazione del CNR-IRPI di Padova, nel monitoraggio e nello studio della dinamica del fenomeno. A tal fine, oltre alle tecniche tradizionali (inclinometri, estensimetri, piezometri, rilievi topografici, ecc..) si è deciso di sperimentare anche l'utilizzo della tecnologia laserscannig da piattaforma aerea. Per questa analisi, gli obiettivi che ci si prefigge sono i seguenti:

- Disporre di un DTM di dettaglio dell'area in frana e del suo intorno per condurre un'analisi geomorfologica di grande accuratezza e tale da consentire di individuare ogni elemento utile per la perimetrazione del corpo principale e dei corpi secondari costituenti la frana;
- Ricavare i vettori spostamento per ogni punto dell'area indagata e caratterizzare le aree in movimento dal punto di vista spazio-temporale.

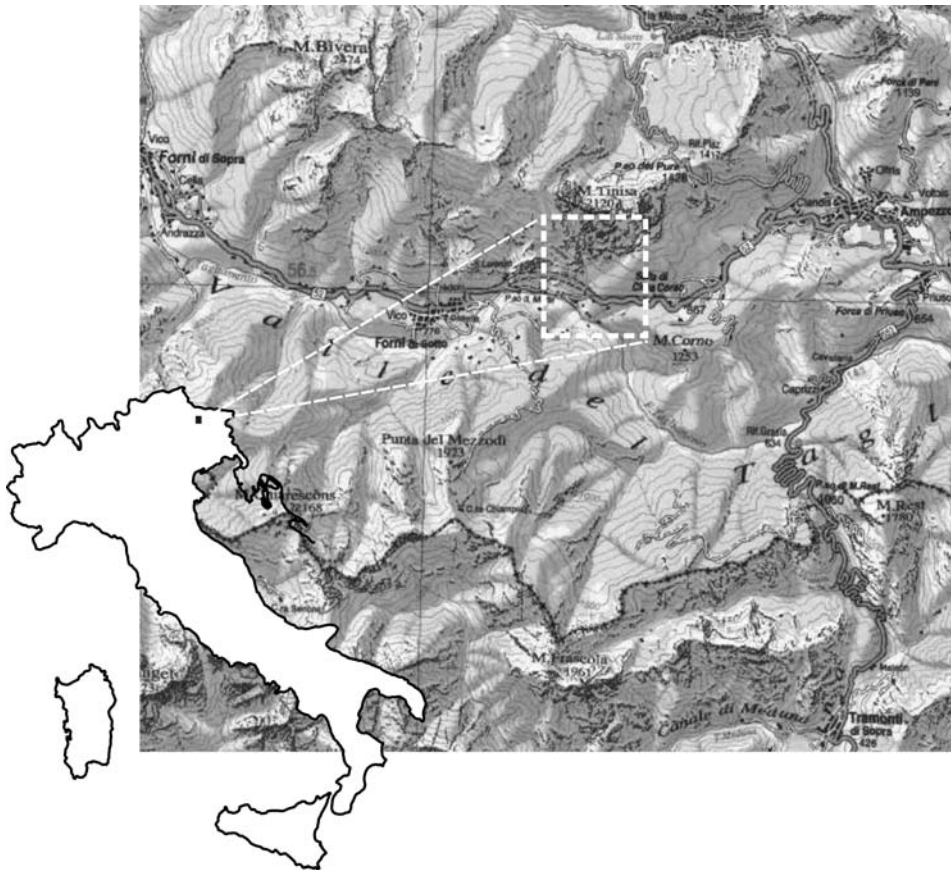


Fig.1 – Ubicazione dell'area

Se per le finalità del primo punto è sufficiente un unico rilievo laser a scansione, per ottenere quanto previsto dal secondo punto è necessario disporre di più rilievi eseguiti a scadenze periodiche.

In questo lavoro vengono descritte le evidenze morfologiche fornite essenzialmente dalla scansione laser le quali sono soltanto un primo supporto e dovranno essere certamente validate dai prossimi rilievi geologici in campagna e dalle misure ricavate dagli strumenti di spostamento.

### Inquadramento geologico

La zona di studio rientra in un settore delle Alpi e Prealpi Carniche caratterizzato da scaglie tettoniche ad andamento generale E – W, vergenti a sud, frutto della deformazione subita in età neogenica. La struttura tettonica principale è la linea di Sauris, un sovrascorrimento ad angolo molto basso che porta i termini carbonatici dal Ladinico superiore al Carnico, cioè dalla Dolomia dello Schlern ai calcari scuri stratificati, a sovrascorrere su quelli del Carnico superiore (argille siltose varicolori e gessi).

Dal punto di vista litologico l'area è caratterizzata da un basamento costituito da una serie carbonatica - clastica triassica, soggiacente una copertura quaternaria rappresentata da alluvioni, conglomerati, morene e depositi di versante. La successione può essere così schematizzata in base ai termini affioranti in zona, dal più antico al più recente:

- *Dolomia dello Schlern (Ladinico sup.)*: calcari o calcari dolomitici di color grigio chiaro, massicci o in grossi banchi
- *Calcari scuri stratificati (Carnico)*: caratterizzata da calcari micritici, e subordinate calcareniti, in strati di spessore variabile da 10 cm al metro, alternati a livelli marnosi scuri che possono raggiungere i 25 cm di spessore
- *Calcari e dolomie stratificati (Carnico)*: un'alternanza di calcari, calcareniti e dolomie con sottili intercalazioni marnose grigie
- *Dolomie cristalline massicce (Carnico)*: doloareniti compatte di colore grigio chiaro

- *Argille siltose varicolori (Carnico)*: prevalentemente argille siltose e siltiti dal color rossastro a cui si intercalano strati arenacei con spessore variabile fino al metro, dolomie marnose grigio biancastre in strati di 5-10 cm
- *Gessi (Carnico sup.)*: caratterizzati dalla presenza di impurità argillose sparse uniformemente nella roccia o in veli centimetrici scuri
- *Dolomie cariate (Carnico sup.)*: dolomie marnose grigie, dolomie chiare spesso vacuolari in strati più spessi, e marne dolomitiche. Sono frequenti brecce di collasso formate da clasti spigolosi centimetrici di dolomie grigio-giallastre analoghe a quelle che costituiscono gli strati sopra e sottostanti, immersi in una matrice marnosa chiara.
- *Dolomia di Forni (Norico)*: dolomie, dolomie marnose scure, decimetriche, selcifere, talvolta laminate, alternate a livelli marnosi ricchi di sostanza organica
- *Depositi quaternari*: accumuli caotici di frane tardoglaciali talvolta cementate (marocche), conglomerati poligenici, alluvioni distribuite lungo l'asse vallivo, coperture detritiche ai piedi dei versanti talora frammiste a sfasciume morenico.

I dati litostratigrafici del presente articolo provengono dalla recente relazione rientrante nella convenzione tra la Direzione della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia e l'I.R.P.I.-C.N.R. per lo studio della frana del Passo della Morte.

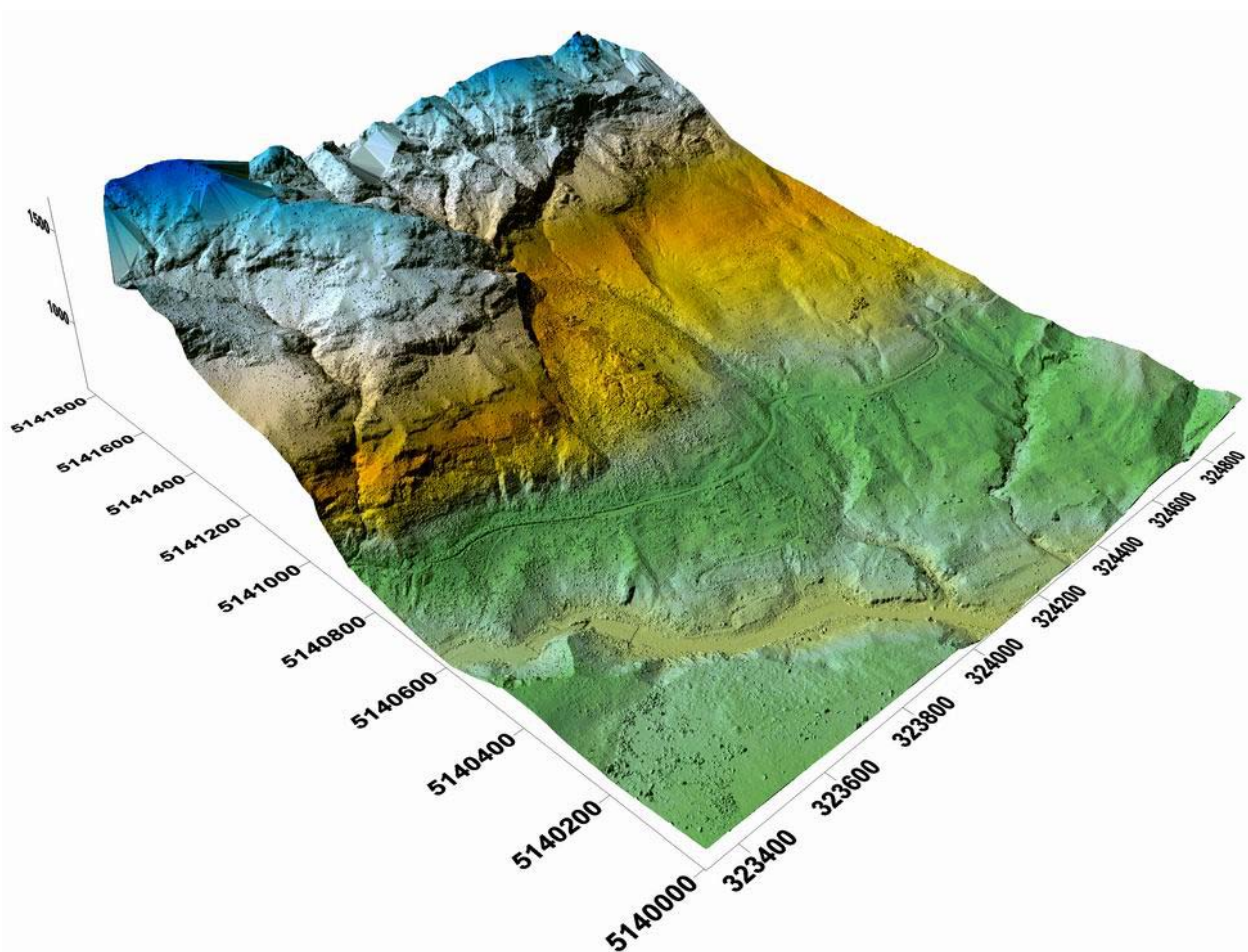


Fig. 2 – Modello digitale del terreno realizzato con griglia a passo di 0,5 m

### Acquisizione

I dati laser scan sono stati acquisiti per conto della Direzione Regionale della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia dalla ditta Helica (s.r.l.) la quale ha equipaggiato un elicottero AS350 con un sistema di scansione laser. Il sistema LIDAR (laser detection and ranging) è un

Optech ALTM 3033 dell'ultima generazione che permette di acquisire dati puntuali sino ad una quota massima di 3000 metri AGL (above ground level), presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

Altitudine di rilievo:	180 – 3000 m
Accuratezza nell'elevazione:	15 cm a 1200 m; 35 cm a 3000 m (1 sigma)
Minima risoluzione:	1 cm
Accuratezza relativa:	2-4 cm @2kHz, 5-10 cm @10kHz
Semiangolo di apertura:	fino a 20°
Acquisizione del dato:	Misura simultanea del primo, dell'ultimo impulso e dell'intensità
Larghezza della strisciata:	fino a 0.72 x altitudine
Frequenza di scansione:	0-100 Hz , dipendente dall'angolo di scansione (es. 28 Hz a ±20°)
Lunghezza d'onda del laser:	1047 nm
Frequenza del laser	33kHz
Divergenza del raggio	0.20 mrad (1/e) o 0.10 mrad (1/e)
Classe del laser	Classe IV (FDA CFR 21)
Ricevitore GPS a bordo	Novatel

La determinazione delle coordinate spaziali dipende dalla precisione dei 3 sensori che costituiscono il sistema laser scanner da piattaforma aerea: il telemetro laser, il sistema inerziale (INS) e il GPS. Il beccheggio, il rollio e lo scarroccio dell'elicottero vengono misurati dal sistema inerziale con frequenza di campionamento di 200 Hz. La piattaforma inerziale, costituita da giroscopi tipo LRG (laser ring gyroscope) ed integrata dal GPS di bordo, consente la determinazione del vettore di stato e del vettore di orientamento. La ricezione del segnale GPS è un fattore di estrema importanza per la corretta acquisizione di dati laserscan, se infatti durante il volo si ha una perdita del segnale GPS non è possibile seguire la pianificazione del volo (mediante software di navigazione).

Il rilievo è stato eseguito con una densità minima di 4 punti per mq sull'intera superficie topografica che si estende per circa 1,6 x 2 km, solo in alcune limitate aree del settore nord occidentale non è presente la copertura del rilievo.

### **Elaborazione dei dati**

Le strisciate laser costituite totalmente da 9.300.000 punti sono state elaborate ed unite mediante software Terrascan della Terrasolid, il rilievo è stato restituito in coordinate UTM33 - WGS84.

Anche se l'applicazione di filtri renderebbe più immediato e leggibile il modello digitale del terreno e le carte da esso derivate, non si è voluto utilizzare alcun algoritmo di rimozione automatica degli oggetti o di smoothing al fine di evidenziare anche i piccoli dettagli morfologici che altrimenti verrebbero mascherati, o comunque lisciati, dalle operazioni di filtraggio.

Per la visualizzazione e la perimetrazione delle morfologie è stato utilizzato il software *Surfer 8*, programma di contouring, modellazione e trattamento di superfici 3D.

Il modello digitale del terreno è stato realizzato con definizione di 0,5 m di lato per ciascuna cella (fig. 2), costruito col metodo della triangolazione con interpolazione lineare. L'algoritmo collega i punti del rilievo con segmenti non intersecanti creando delle superfici triangolari, in questo modo dati originali rilevati dalla scansione laser vengono mantenuti come vertici dei triangoli.

### **Analisi geomorfologiche**

L'analisi geomorfologica e geometrica nello studio dei dissesti geostatici è un elemento essenziale per la rappresentazione spazio-temporale dei movimenti e delle deformazioni nelle zone

instabili. Inoltre essa contribuisce in maniera determinante all'elaborazione dei modelli geologici, idrogeologici e geomeccanici del sito.

A tal fine è stata realizzata una carta geomorfologica sulla base dei rilievi laser considerando principalmente tre aspetti che risultano ben evidenti dalle acquisizioni laser: idrografia, lineamenti strutturali, elementi morfologici perimetrati tramite la realizzazione di 3 "carte digitali" con griglia regolare a passo 0,5 m, ovvero:

- carta a sfumo (*shadow relief*): permette una rapida definizione delle caratteristiche morfologiche a media scala. Il sistema calcola la quantità di illuminazione, espressa con valori da 0 a 255, ricevuta da ciascuna cella rispetto ad una fonte luminosa posta a distanza infinita ed avente un determinato Azimut ed una determinata altezza sul piano dell'orizzonte, tenendo conto delle ombre (fig. 3).
- carta delle pendenze (*terrain slope*): si sono messe in risalto tutte quelle linee perpendicolari alla direzione del movimento franoso, dovute principalmente a rigonfiamenti della zona di accumulo e alla formazione di scarpate all'interno del corpo di frana prodotte. Vengono inoltre individuati accuratamente i tratti su verticali e i netti cambi di pendenza creati da un'accelerata erosione fluviale e dagli orli di scarpata di frana (fig. 5 e 6).
- carta dell'esposizione dei versanti (*aspect*): permette una classificazione della direzione dei pendii ottenendo un valore angolare rispetto al nord, misurato in gradi e con convenzione di 0 gradi per il nord.

Il rilievo laser scan restituisce 4 valori per ogni punto rilevato, le tre coordinate spaziali (x,y,z) ma anche l'intensità del raggio laser ricevuto, che esprime il valore di riflettività dell'elemento "colpito".

Dall'intensità del raggio laser, sia del primo che dell'ultimo impulso, non si sono evidenziate soddisfacenti informazioni se non quelle relative al reticolo idrografico il quale si discosta leggermente quello della carta tecnica regionale, nonché il limite del detrito di versante.

### ***Idrografia***

Il reticolo idrografico è visibile dal rilevamento aereo solamente per le morfologie ad esso connesso (fig. 5 e 6).

Sono riconoscibili le accentuate incisioni del rio Riascie e del rio Verde su i depositi quaternari nei tratti terminali dove sono presenti limitati scoscendimenti del terreno.

Il tratto del rio Schuses presente nel rilievo è influenzato dalle lineazioni tettoniche e/o stratigrafiche: le incisioni nella dolomia passano da una direzione NW – SE, subparallela alla stratificazione, ad una N – S fino a diventare NE - SW subparallela alla nicchia di distacco / faglia trascorrente. Tale impostazione strutturale è leggibile anche delle incisioni sui calcari dolomitici del rio Verde il quale prende un andamento a zigzag lungo le direttrici NW – SE e NE – SW.

Il letto del fiume Tagliamento, presente nella carta solamente per un breve tratto, con una pendenza media del 2%, ha un andamento vagamente sinuoso imposto dagli accumuli di frana. Le superfici subpianeggianti identificate in sinistra idrografica potrebbero rappresentare vecchie superfici di origine fluviale da collegarsi all'evento franoso tardoglaciale che sbarrò il corso del fiume stesso (MARTINIS 1985). Testimonianza di tale evento sarebbero i depositi lacustri rinvenuti nella parte superiore del corso. Vengono inoltre evidenziati almeno 4 ordini di terrazzi fluviali, posti in media alle quote di 710, 660, 630, 605 m s.l.m. .

### ***Lineamenti strutturali***

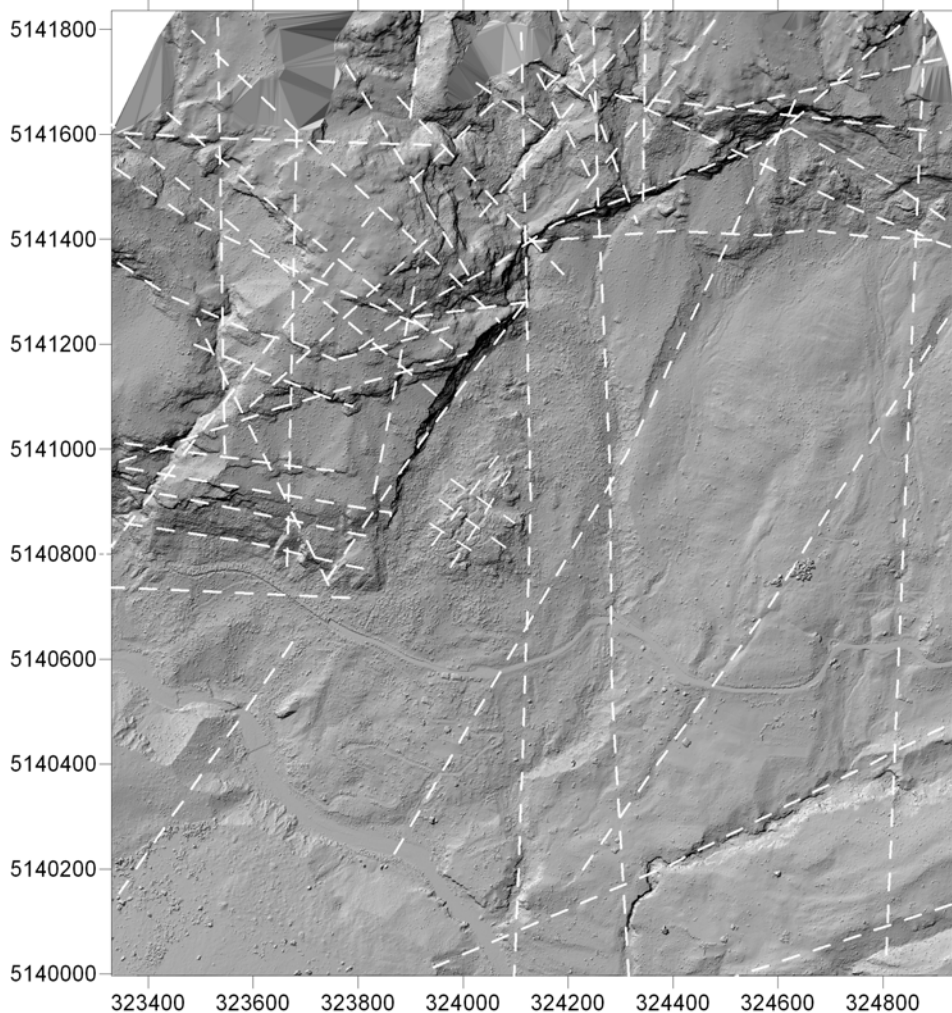
L'elaborazione del rilievo laserscan permette di evidenziare una serie di lineazioni, le quali, in accordo con i dati bibliografici (PISA 1972, VENTURINI 1990) di recenti studi condotti dall'IRPI di Padova per conto della Direzione Regionale della Protezione Civile, corrispondono a precise famiglie di discontinuità.

Il quadro strutturale risulta piuttosto complesso per la presenza di numerosi disturbi tettonici, alcuni di importanza regionale ed altri minori, comunque influenzati soprattutto dalle precedenti strutturazioni sviluppatasi essenzialmente nella fase estensionale triassica.

Il lineamento principale è il ramo più meridionale di un fascio di strutture che nell'insieme prendono il nome di Linee di Sauris. Nella carta è identificabile nel brusco cambio di pendenza delle pareti dolomitiche del Monte Tinisa con i detriti di versante ed i limitati affioramenti delle argille siltose varicolori del Carnico. Il sovrascorrimento ad orientamento E - W è dislocato da una faglia trascorrente NE - SW la quale imposta la nicchia di distacco di recente scivolamento nella dolomia dello Schlern..

L'intero versante meridionale del Monte Tinisa è caratterizzato da evidenti lineazioni E - W imputabili sia a faglie inverse ad alto angolo che alle testate di strato delle formazioni calcareo dolomitiche affioranti.

Altri lineamenti rilevabili sono quelli a direzione N - S e NW -SE facenti parte con buona probabilità ad un sistema di discontinuità coniugato ai thrusts di importanza regionale ad orientamento E - W. Tutte queste discontinuità strutturano le pareti meridionali del Monte Tinisa, il rio Scuses e il rio Verde nel tratto in roccia carbonatica .



**Fig.3** – Lineamenti strutturali sulla carta a sfumo

### ***elementi morfologici***

Le geometrie del territorio esaltate dalla visualizzazione dei dati in modalità *shaded relief* e *terrain slope* consentono di individuare le forme morfologiche e di interpretare dei rapporti spazio - temporali tra tali forme.

Sono stati riconosciuti quattro settori con caratteristiche morfologiche a grande scala omogenee (fig. 4):

- 1) il settore posto a NW è costituito dalle pendici meridionali del monte Tinisa caratterizzate a ovest da Dolomia dello Schlern, ad est da calcari dolomitici del M. Tiarfin, complessivamente caratterizzati da una acclività superiore ai 35°. Le balze rocciose sono impostate sui principali sistemi di discontinuità sia strutturali che stratigrafici (fig.3 e 5)
- 2) il settore posto in destra idrografica del fiume Tagliamento è caratterizzato da una grande accumulo di frana tardo glaciale (marocca) con accumuli caotici di blocchi di varie dimensioni appartenenti alle unità carbonatiche ladinico – carniche (MARTINIS 1985), l'acclività è generalmente inferiore ai 10°.
- 3) il limitato settore posto a SE del rilievo, confinato dal rio Riascie, dove sono evidenti dei lineamenti WSW – ENE, il più meridionale dei quali mette in contatto tettonico le Dolomie cariate con la Dolomia di Forni. Qui è possibile delimitare almeno due ordini di terrazzi fluviali (fig. 5 e 6).
- 4) la zona in deformazione posta in sinistra idrografica fiume Tagliamento compresa tra le quote 1200 e 600 metri s.l.m. delimitata da scarpate di oltre 45° che si prolungano fino a sella Cima Corso per 1 km oltre il limite orientale del rilievo. Tutta quest'area interessata da litologie incompetenti viene interpretata come paleofrana. La parte interessata dal rilievo può essere suddivisa in ulteriori 2 settori minori: la parte occidentale con pendenze fra i 20° e 40 ° è costituita dal grosso scivolamento in dolomia dello Schlern e da un deposito detritico grossolano, la parte orientale è invece caratterizzata da pendii con acclività compresa tra i 10° e 20° con limitati affioramenti di argille siltose varicolori e gessi, coperti da detrito di versante talvolta cementato e da conglomerati nella parte meridionale.

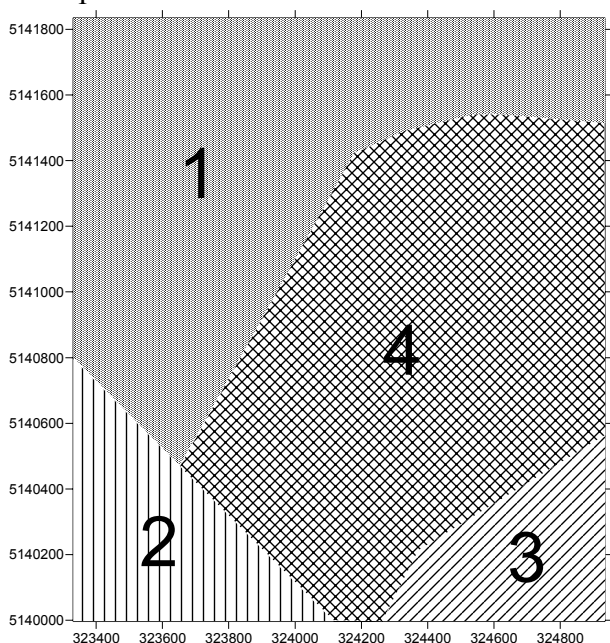


Fig.4 – Suddivisione dell'area in 4 settori con macromorfologie omogenee

Ed è proprio in quest'ultimo settore che si possono individuare geometrie ed evidenze morfologiche tali da poter ipotizzare diversi stadi evolutivi del complesso fenomeno (fig. 5).

Il corpo di frana che interessa l'imbocco della galleria è ben riconoscibile al centro della carta. La superficie è delimitata da un netto cambio di pendenza che delimita un'area di quasi 400.000 m<sup>2</sup>, ad occidente poggia con una contropendenza sulla parete subverticale orientata NNE – SSW, alta un centinaio metri, la quale potrebbe essere una faglia trascorrente sinistra - nicchia di distacco del scivolamento i cui blocchi in Dolomia dello Schlern sono riconoscibili al centro del perimetro per un'estensione di circa 50.000 m<sup>2</sup>. Nella massa rocciosa del scivolamento sono riconoscibili due famiglie di discontinuità (fig.3): una si presenta subparallela alla nicchia di distacco, l'altra, facente parte di un sistema coniugato, ha direzione NW – SE.

Il settore orientale è interessato da una coltre detritica parzialmente cementata riconducibile ad episodi gravitativi più antichi, deducibili sia per la sovrapposizione del movimento descritto precedentemente, sia per la cementazione del detrito nonché per la presenza di antichi terrazzi fluviali impostati nella zona di accumulo. Numerose lineazioni a direzione NW – SE sono cartografabili nella zona di distacco. Tali elementi trasversali alla direzione dell'antico movimento gravitativo potrebbero essere riconducibili a fessure trasversali e/o a scarpate secondarie nella zona di distacco, manifestatisi a più riprese in passato . La zona di accumulo è in parte mascherata da una serie di terrazzi compresi fra i 630 e 700 m s.l.m. prodotti dal fiume Tagliamento dopo l'ultima glaciazione, ed è proprio in quest'area che si sono trovati notevoli affioramenti di conglomerato poligenico. L'antico accumulo è inciso dalle acque del rio Verde, rio Riascie e del rio Bianco, evidenziando con netti orli di scarpata i tratti finali dei primi due, dove sono riconoscibili anche le forme concave di limitati fenomeni di scoscendimento.

Dalle forme erosive all'interno di questo esteso corpo di frana si potrebbe dedurre la presenza di antichi debris flows di cui si possono riconoscere soltanto alcune tracce delle aree di alimentazione e dei canali di flusso nella parte più orientale dell'area di rilievo, attualmente inattivi sono stati ripresi come letto del rio Bianco totalmente mascherati dalla vegetazione .

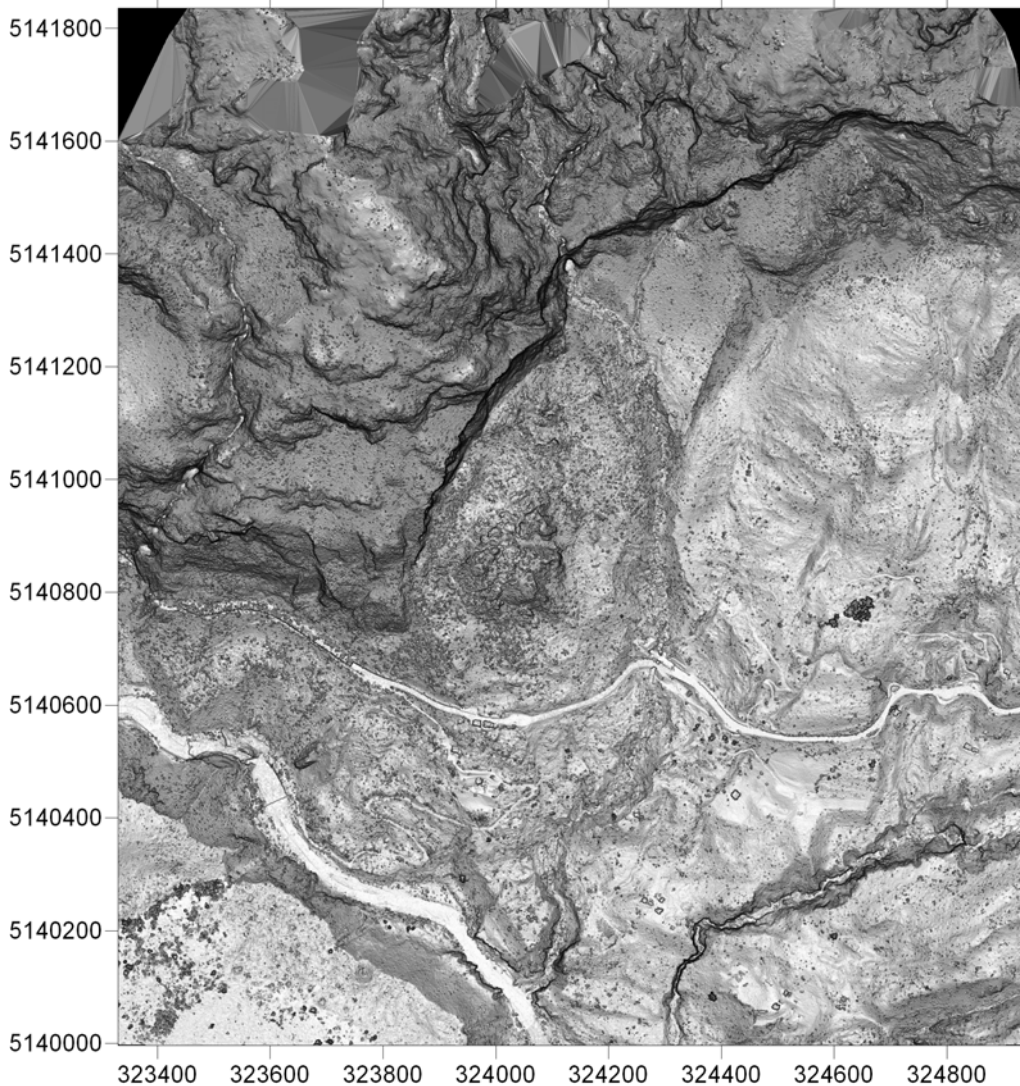


Fig. 5 – Carta delle pendenze con gradiente sfumato dal bianco (orizzontale) al nero (verticale).



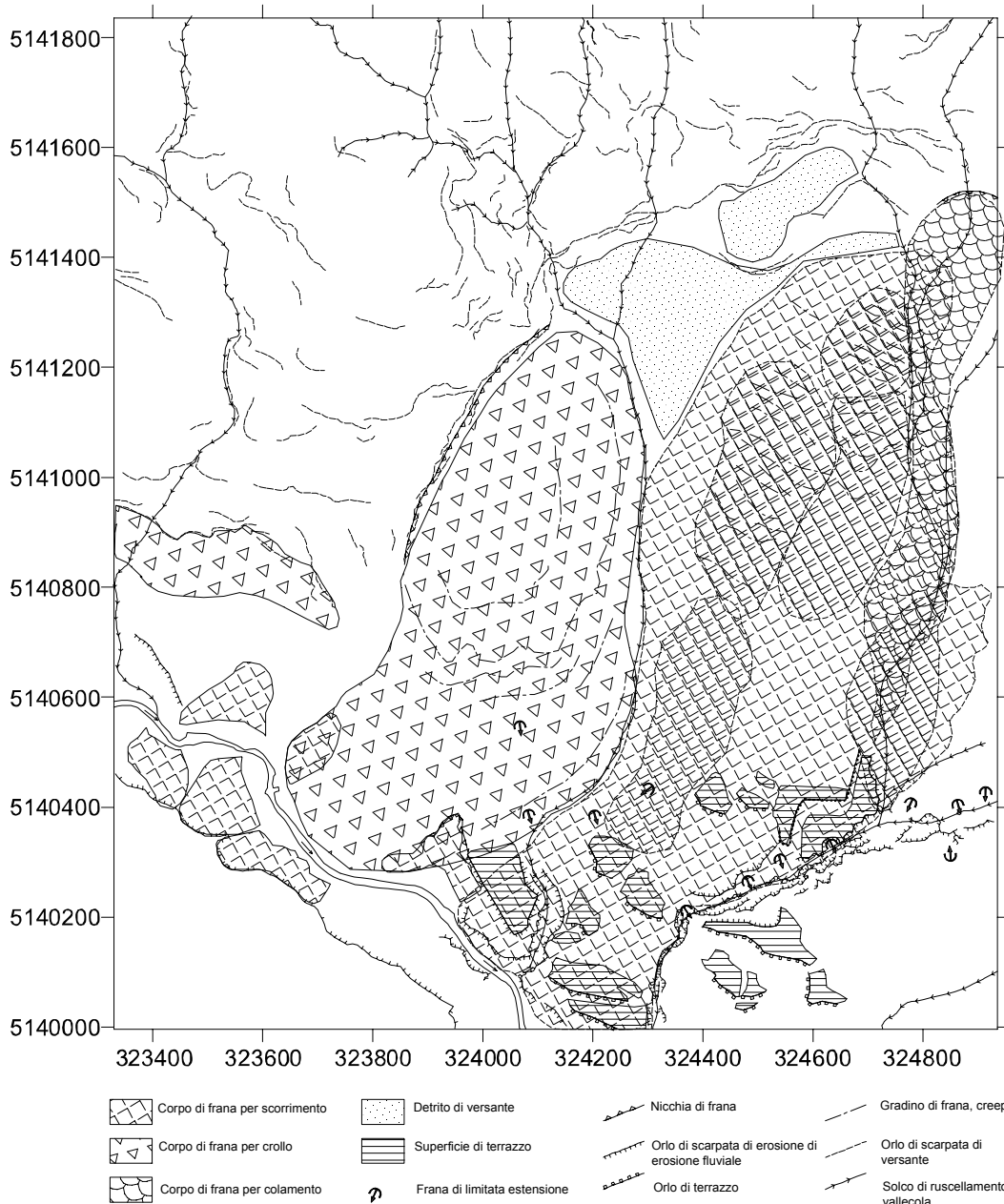


Fig. 6 – Interpretazione geomorfologica

## Conclusioni

Il rilievo LIDAR ha consentito l'acquisizione di un DTM e di un DSM di alta qualità su un territorio articolato di circa 3 Km<sup>2</sup>, con un grado di dettaglio e di informazioni sull'andamento del terreno non ottenibili con altre tecniche. Questo risultato oltre a rendere molto più precisi i prossimi studi di carattere geologico e idrogeologico dell'area, fornisce un nuovo spunto interpretativo per l'evoluzione geologica – ambientale di questo complesso settore della catena carnica.

I principali vantaggi riscontrati da tale metodologia di rilievo per l'analisi geomorfologica sono dunque:

- indipendenza delle condizioni di luce: l'indipendenza dalle zone d'ombra è un fattore molto importante specialmente in zone montane,
- possibilità di registrare l'ultimo impulso: permette di creare un modello digitale del terreno privo (o quasi) della copertura vegetale, essenziale per l'identificazione delle micro e mesomorfologie molto spesso mascherate dalla vegetazione.
- rapidità: qualche ora per la scansione di un territorio piuttosto vasto.
- creazione precisa delle carte delle pendenze (e non interpolata come per le curve di livello)

- capacità di rilievo di particolari che difficilmente potrebbero essere osservati direttamente sul terreno
- evidenze di relazioni spaziali non percettibili in campagna.

Naturalmente un rilievo geomorfologico da rilievo laser scan deve essere necessariamente affiancato da un controllo diretto sul terreno, in modo da integrare l'efficacia del lavoro di campagna con l'efficienza di uno studio dei modelli digitali o delle carte create dalle nuvole di punti del rilievo laser scan.

Tra le implementazioni future per la caratterizzare il movimento del fenomeno franoso si stanno studiando metodologie che permettano la miglior e più precisa sovrapposizione di DTM rilevati in tempi diversi. Gli eventuali spostamenti rilevati dalle successive scansioni saranno validati sia dalle misurazioni inclinometriche che da quelle topografiche per il monitoraggio del fenomeno in atto.

## **Bibliografia**

- CARULLI G.B., FRASCARI F. & SEMENZA E. (1982) - *Geologia delle Alpi Tolmezzine (Carnia)*. In: Castellarin A. & Vai G.B. (a cura di) - Guida alla geologia del Sudalpino centro-orientale. Guide geol. reg. S.G.I., 337-348, Bologna.
- COREN F., PLOS D., STERZAI P., VIDMAR R. (2002) - *Valutazione del sistema LIDAR per generazione di modelli digitali del terreno e monitoraggio ambientale in diversi scenari operativi*. Atti della 6a Conferenza Nazionale Asita Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale, Perugia
- MARTINIS B., (1985) - *Il lago quaternario di Forni di Sotto*. In Alto, 67, 71-83.
- MASO M. (2002) – *Note sulle metodologie operative per rilievi di laser-scanning e la generazione di DTM di alta qualità*. Cinquefiumi riv. quadr. , 23-33, Venezia.
- PISA G. (1972) - *Geologia dei monti a N di Forni di Sotto, Carnia occidentale*. Giorn. Geol. ser. 2, **38** (2), 543-691.
- VENTURINI C. (1990) - *Cinematica neogenico-quadernaria del Sudalpino orientale (settore friulano)*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. ,109-116.
- I.R.P.I.-C.N.R. Padova - *Relazione interna (marzo 2003) Convenzione tra la Direzione Regionale della Protezione Civile - Regione Friuli Venezia Giulia e l'I.R.P.I.-C.N.R. per lo studio della frana del Passo della Morte in Comune di Forni di Sotto (Ud)*
- Manuale di Surfer 8.0*  
<http://www.optech.on.ca>