



RAPPORTI  
TECNICI INGV

Analisi della pericolosità di frana  
dei versanti interni del Lago Albano



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

461

**Direttore Responsabile**

Valeria DE PAOLA

**Editorial Board**

Milena MORETTI - Editor in Chief (editorinchief.collane-editoriali@ingv.it)

Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)

Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)

Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)

Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)

Luigi CUCCI (luigi.cucci@ingv.it)

Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)

Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)

Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)

Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)

Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)

Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)

Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)

Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

**Segreteria di Redazione**

Francesca DI STEFANO - Coordinatore

Rossella CELI

Robert MIGLIAZZA

Barbara ANGIONI

Massimiliano CASCONI

Patrizia PANTANI

Tel. +39 06 51860068

redazione@ingv.it

**REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO**

© 2014 INGV Istituto Nazionale

di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

# RAPPORTI TECNICI INGV

Analisi della pericolosità di frana dei versanti  
interni del Lago Albano

*Landslide hazard assessment of the internal  
slopes of Lake Albano*

Antonio Patera<sup>1</sup>, Andrea Fabbri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica

<sup>2</sup>Università degli Studi di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra

Accettato 8 agosto 2022 | Accepted 8 August 2022

Come citare | How to cite Patera A., Fabbri A., (2023). Analisi della pericolosità di frana dei versanti interni del Lago Albano. Rapp. Tec. INGV, 461: 1-58, <https://doi.org/10.13127/rpt/461>

In copertina Esempio di pattern di predizione del modello ELR | Cover Example of prediction pattern using the ELR model

461



# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Riassunto</b>   | <b>7</b>  |
| <i>Abstract</i>  | <b>7</b>  |
| <b>Introduzione</b>  | <b>8</b>  |
| <b>1. Inquadramento dell'area di studio</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1 Inquadramento geologico  | 8         |
| 1.2 Inquadramento geomorfologico   | 10        |
| <b>2. Cartografia</b>  | <b>12</b> |
| 2.1 Cartografia di base  | 12        |
| 2.2 Cartografia tematica   | 13        |
| <b>3. Studio della predisposizione dei versanti ai movimenti di massa</b>          | <b>14</b> |
| 3.1 L'equazione di regressione   | 15        |
| 3.2 Analisi esplorativa di regressione con lo strumento Exploratory Regression     | 15        |
| 3.3 Analisi di regressione Ordinary Least Squares                                  | 21        |
| <b>4. Il Rapporto empirico di verosimiglianza ELR</b>                              | <b>23</b> |
| 4.1 Esempio di modellizzazione di relazioni spaziali                               | 24        |
| 4.2 Strategia di analisi predittiva  | 27        |
| 4.3 Validazione incrociata   | 28        |
| <b>5. Risultati</b>  | <b>29</b> |
| 5.1 Risultati dell'analisi di regressione  | 29        |
| 5.2 Risultati dell'analisi del Rapporto empirico di verosimiglianza ELR            | 29        |
| 5.2.1 Analisi del supporto alla modellizzazione degli ISP                          | 30        |
| 5.2.2 Visualizzazione di pattern di predizione per LT1 - Debris flow channels      | 31        |
| 5.2.3 Supporto numerico al pattern di predizione di forme lineari subaeree LT1-LT6 | 33        |
| 5.2.4 Esperimenti per le Forme lineari subaeree LA1-LA4                            | 38        |
| 5.2.5 Esperimenti per le Forme poligonali subaeree PT1-PT5                         | 40        |
| 5.2.6 Esperimenti per le Forme poligonali subaeree PA1-PA4                         | 41        |
| <b>6. Conclusioni</b>  | <b>43</b> |
| <b>Bibliografia</b>  | <b>43</b> |
| <b>Appendice A: Tematismi utilizzati nell'analisi</b>                              | <b>47</b> |



## Riassunto

Il Lago Albano è un lago di origine vulcanica situato nel distretto vulcanico quaternario dei Colli Albani, a circa 20 km a SE del centro metropolitano di Roma. L'edificio vulcanico che ospita il lago è caratterizzato da fianchi esterni gentilmente inclinati e da elevate pendenze in corrispondenza delle pareti interne del cratere, dove sono evidenti i segni di frequenti fenomeni franosi.

La presenza di numerose abitazioni e attività ricreative lungo le pendici interne del cratere, in particolare lungo il bordo e lungo la costa del lago, rendono l'area potenzialmente ad alto rischio non solo per i fenomeni di instabilità dei versanti interni, ma anche per gli effetti secondari dovuti alle onde di tsunami che potrebbero generarsi in seguito all'impatto delle masse di terreno subaereo in frana sulla superficie del lago o che potrebbero essere causate da movimenti di massa subacquei.

Scopo del presente lavoro è stata la valutazione della pericolosità di frana dell'area di studio sul Lago Albano utilizzando le tecniche del metodo dei minimi quadrati OLS (*Ordinary Least Squares*) e del rapporto empirico di verosimiglianza ELR (*Empirical Likelihood Ratio*).

Il modello proposto ha permesso di valutare le relazioni spaziali tra le frane e i tematismi di supporto all'analisi, misurando e valutando il rapporto tra ogni specifico tipo di frana e ogni mappa digitale di supporto. Il modello potrebbe inoltre beneficiare dall'aggiunta di nuove informazioni di supporto all'analisi quali nuovi livelli informativi e dati più dettagliati che permetterebbero sicuramente di migliorare i risultati ottenuti.

## Abstract

*Lake Albano has a volcanic origin. It is located in the Quaternary volcanic district of the Colli Albani (Albani Hills) at approximately 20 Km from the metropolitan center of Rome. The volcanic edifice hosting the lake is characterized by gently inclined outer flanks and steep slopes in correspondence with the internal walls of the crater. Here is where much evidence is found of slope failures producing landslides.*

*The presence of numerous dwellings and of recreational activities along the internal slopes of the crater, and in particular along the edge and the lake coastline, make the area of potentially high risk, not only because of the inner intense slope instability, but also because of possible secondary effects due to tsunamis waves that might be generated by the impact of sliding subaerial masses on the lake surface or by sub-aqueous landslides.*

*Aim of this work is evaluating landslide hazards in the study area of Lake Albano by means of techniques based on Ordinary Least Squares, OLS, and of the Empirical Likelihood Ratio, ELR, used as a modeling function.*

*The model proposed made it possible to analyze the spatial relationships between landslides and the themes supporting the analysis, measuring and evaluating the relationship between each specific type of landslide and each supporting digital map. The model could also benefit from the addition of new information to support the analysis such as new information levels and more detailed data that should certainly improve the results obtained.*

Keywords Lago Albano; Frane; Analisi di pericolosità | Lake Albano; Landslides; Hazard analysis.

# Introduzione

Il Lago Albano è il lago vulcanico più profondo tra quelli presenti in Italia. Appartiene al distretto vulcanico quaternario dei Colli Albani, attivo a partire da 600.000 anni fa. Il complesso occupa una vasta area a circa 20 km a SE del centro metropolitano di Roma. La struttura generale è quella di una grande caldera con un cono centrale e due caldere minori più recenti annidate all'interno, oltre ad alcune strutture più o meno eccentriche prodotte dall'attività esplosiva. Il punto più elevato del complesso è il Monte Cavo con i suoi 949 m s.l.m.

La struttura vulcanica che ospita il Lago Albano è caratterizzata da fianchi esterni gentilmente inclinati e da elevate pendenze in corrispondenza delle pareti interne del cratere. Il bordo del cratere ha forma ellittica con asse maggiore di circa 4300 m e minore di circa 2800 m e ha quote variabili da un massimo di 585 a un minimo di 390 m s.l.m. La profondità massima del lago è di 167 m, mentre la costa si trova a una quota di circa 290 m s.l.m. La superficie del lago ha un'area di circa 6 km<sup>2</sup>.

La presenza di un vulcano potenzialmente attivo in prossimità dell'area metropolitana di Roma e dei centri circostanti, tutti densamente abitati, rende l'area potenzialmente ad alto rischio non solo per lo scenario di nuove eruzioni, ma anche per la sismicità ricorrente che periodicamente colpisce l'area, per la possibilità di improvvisi rilasci di gas dal fondo del lago e per la presenza di numerose frane subaeree e subacquee all'interno del cratere.

Sono infatti noti, sin dai tempi storici, episodi di fuoriuscita dell'acqua del lago dal punto topograficamente più basso del margine nordoccidentale del cratere, possibilmente causati dall'emissione dal fondo del lago di fluidi di origine magmatica ricchi di CO<sub>2</sub>, che hanno generato una successione di depositi da lahar lungo il versante esterno, verso la piana di Ciampino [Funciello et al., 2002]. L'ultimo di questi eventi catastrofici, descritto da Plutarco nelle Storie di Temistocle e Camillo e da Tito Livio nella sua Storia Naturale, è datato 398 a.C., a seguito del quale i Romani nel 394 a.C. realizzarono un tunnel drenante che ha mantenuto da allora il livello del lago a 70 m al di sotto della soglia più bassa del cratere. La valutazione del rischio dovuto ai fenomeni di instabilità delle pendici interne del cratere deve inoltre tenere conto degli effetti secondari dovuti alle onde di tsunami che potrebbero generarsi in seguito all'impatto delle masse di terreno subaereo in frana sulla superficie del lago o dovute a movimenti di massa subacquei.

## 1. Inquadramento dell'area di studio

### 1.1 Inquadramento geologico

I Colli Albani sono un complesso vulcanico quiescente, dove ancora si riscontrano indizi di attività vulcanica quali la circolazione idrotermale con emissione di gas di origine magmatica [Carapezza et al., 2021], la sismicità e il sollevamento del suolo [Amato et al., 1994; Amato e Chiarabba, 1995].

Il complesso è ciò che resta di tre diversi edifici vulcanici parzialmente sovrapposti, risultato di una complessa successione di tre fasi eruttive con notevoli differenze nel tipo di attività [De Rita et al., 1988; De Rita et al., 1992; De Rita et al., 2002; Karner et al., 2001]: la fase Tuscolano-Artemisio (600-350 mila anni fa), la fase Faete (350-270 mila anni fa) e la fase finale idromagmatica (da 200 mila anni fa al presente).

La fase più antica ha dato origine al vulcano primordiale, il Vulcano Laziale, ed è stata caratterizzata dalla deposizione di un'estesa coltre ignimbratica con una superficie di circa 1600 km<sup>2</sup>, intercalata da depositi di ricaduta di scorie, grandi volumi di colate di lava e depositi vulcanoclastici. Questa fase ha dato origine a un vasto edificio vulcanico attorno alla caldera centrale, collassata dopo una forte eruzione esplosiva.



Dopo il collasso della caldera centrale, la seconda fase di attività vulcanica è iniziata con uno stile completamente diverso, caratterizzato da minori volumi di lava e da eruzioni fissurali effusive e stromboliane alimentate da risalite magmatiche lungo fratture delle rocce peri- ed extra-caldera originate dal collasso. Questa deposizione di lave, di depositi di scorie e vulcanoclastici ha dato origine allo stratovulcano Faete, innalzatosi all'interno della caldera collassata in precedenza.

Il periodo di attività più recente è caratterizzato dall'interazione esplosiva del magma con acqua esterna, sia sotterranea (l'acquifero carsico contenuto nel basamento carbonatico) sia lacustre di laghi craterici (*maar*). Questa fase di attività freatomagmatica è caratterizzata da eruzioni con volumi minori di materiale vulcanico originatesi da maar eccentrici situati lungo le pendici occidentali e settentrionali del vulcano dei Colli Albani, a sud-est del Faete, e dalla formazione di coni di tufo. L'ultimo centro eruttivo è quello di Albano, sede attuale dell'omonimo lago, che ha prodotto depositi di scorie fino a circa 36 mila anni [De Rita et al., 1988; Trigila, 1995; Villa et al., 1999; Giordano et al., 2002; Funicello et al., 2003; Marra e Karner, 2005; Freda et al., 2006]. Esistono datazioni e ricostruzioni cronostratigrafiche dibattute che estendono l'attività all'Olocene, basate sulla scoperta di una serie di depositi recenti da colate di fango (*lahar*) dovute all'esonazione del lago circa 5800 anni fa [Funicello et al., 2003], o in base all'esonazione del 398 a.C. La causa di questi fenomeni potrebbe essere stata l'improvvisa iniezione sul fondo del lago di fluidi caldi ricchi di CO<sub>2</sub>, sicuramente presenti nel sottosuolo del vulcano [Barberi et al., 1989].

Le numerose manifestazioni di gas della zona, l'alto flusso di CO<sub>2</sub> in corrispondenza di alti strutturali del basamento carbonatico, l'evidenza di acquiferi pressurizzati anche a debole profondità, l'improvviso aumento del rilascio del gas e della temperatura delle acque in occasione di eventi sismici, indicano che un simile pericolo esiste anche ai giorni nostri [Funicello et al., 2002].

La composizione dei prodotti dei Colli Albani ha in generale carattere alcalino-potassico, come molti dei prodotti del vulcanismo dell'Italia Centrale, dovuta anche a processi di contaminazione del magma con le rocce carbonatiche incontrate nella risalita prima di giungere alla superficie. Il residuo endogeno di tali processi è all'origine della circolazione idrotermale e delle emissioni gassose che ancora si manifestano. Il suolo dell'area emette CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S e questi gas sono la principale causa di pericolo naturale associato al distretto vulcanico romano [Carapezza e Tarchini, 2007].

Per quanto riguarda il cratere di Albano, le pendici interne mostrano depositi idromagmatici con alternanze di letti di scorie e lapilli con strati ricchi di cenere, generalmente cementati a causa di un processo di zeolitizzazione, con spessori massimi fino a 30 m, che localmente si sovrappongono a spessi banchi di lava e depositi di scorie ascritti a precedenti fasi vulcaniche [Bozzano et al., 2009]. Questi depositi idromagmatici sono caratterizzati da due lithofacies tipiche [Giordano et al., 2002]. La prima, che rappresenta la maggiore parte dei depositi del maar, è un'alternanza di strati subparalleli o a basso angolo e a stratificazione incrociata di letti di lapilli e di strati ricchi in cenere, generalmente cementati a causa del processo di zeolitizzazione. La seconda litofacies è rappresentata da depositi massivi e caotici con ceneri spessi sino a 30 m, contenenti xenoliti con dimensioni di blocchi, fortemente cementata per il processo di zeolitizzazione.

Lungo le pendici interne del vulcano, i depositi idromagmatici si sovrappongono localmente a spessi banchi di lava e di depositi di scorie ascritti alle fasi Tuscolano-Artemisio e Faete, che affiorano nell'area subaerea meridionale e sudorientale topograficamente più bassa. Inoltre, una serie di facies riconducibili a colate con giacitura a franapoggio ricoprono localmente le pendici interne del cratere a partire dal bordo fino al livello del lago [De Rita et al., 1988]. L'inquadramento geologico subaereo è completato da recenti conoidi detritici e di falda e da depositi sedimentari costieri che ricoprono le aree più basse delle pendici subaeree interne del cratere [Bozzano et al., 2009].

I sedimenti lacustri ricoprono interamente il fondo del lago, con spessori di circa 14 m [Chondrogianni et al., 1996]. La presenza di hiatus nei sedimenti del lago, la variazione del tasso di deposizione di  $\text{CaCO}_3$  e la composizione isotopica suggeriscono delle oscillazioni del livello del lago avvenute nell'Olocene [Chondrogianni et al., 1996; Funicello et al., 2002; Marra e Karner, 2005] presumibilmente da ricondurre a periodici sciami sismici [Amato et al., 1994; Chiarabba et al., 1997], sollevamenti del suolo [Amato e Chiarabba, 1995] e fenomeni parossistici di degassamento [Carapezza e Tarchini, 2007; Carapezza et al., 2008].

All'interno del cratere sono state identificate tre grandi piattaforme. La prima, la più larga, si trova nella parte nord della depressione vulcanica ed è caratterizzata da una superficie suborizzontale gentilmente inclinata verso sud, con una porzione subaerea che forma la spiaggia odierna e quote comprese tra i 10 e i 30 m sotto il livello del lago. La porzione sommersa è interrotta bruscamente da una scarpata alta circa 80 m. La seconda piattaforma ha forma ad anello e si trova nella porzione centro-meridionale della depressione vulcanica. All'interno è presente una scarpata sommersa profonda tra i 35 e i 50 m. Due più piccole depressioni circolari sono state identificate lungo il lato settentrionale e quello occidentale. La terza piattaforma si trova sul fondo del lago a una quota compresa tra i 126 e i 133 m s.l.m. Qui si possono distinguere chiaramente tre maar, tra i quali quello settentrionale sembra essere il più antico, mentre quello che si trova al centro, il più recente, ha pareti interne che formano una scarpata acclive che giunge al punto più profondo del lago [Bozzano et al., 2009].

## 1.2 Inquadramento geomorfologico

La presenza di un vulcano potenzialmente attivo in prossimità di un'area densamente popolata come l'area metropolitana di Roma ha condotto i ricercatori a valutare il potenziale rischio vulcanico attraverso studi multidisciplinari che includono il monitoraggio dei gas dissolti nel lago, la valutazione del rischio di frana dei versanti interni del Lago Albano e il relativo rischio di onde di tsunami particolarmente potenziate nei bacini chiusi [Jorstad, 1968; Plafker e Eyzaguirre, 1979; Schnellmann et al., 2002; Geist et al., 2003; Wagner et al., 2003; Hubbard et al., 2005; Panizzo et al., 2005; Didenkulova et al., 2006].

Numerose sono le ricerche effettuate per valutare il rischio di frana e di onde di tsunami che potrebbero coinvolgere le strutture ricettive, ricreative e abitative situate lungo la costa del lago [Mazzanti et al., 2007]. I fianchi interni del cratere del lago hanno infatti una morfologia molto acclive che li rende potenzialmente a rischio per diverse tipologie di frane sia subaeree sia subacquee [Anzidei et al., 2007; Mazzanti et al. 2007; Bozzano et al., 2009]. I due principali fattori di pericolosità sono rappresentati da crolli e cadute di grossi massi e da fenomeni di scorrimento e lo scenario più pericoloso prevede eventi dove un grande volume di materiale viene immesso nel lago a grande velocità, con conseguente probabilità di innescare uno tsunami [Anzidei et al., 2008; Bozzano et al., 2009]. Inoltre, una frana di questo tipo potrebbe generare un rollover di  $\text{CO}_2$  come successo in Camerun nel Lago di Monoun [Sigurdsson et al., 1987].

I depositi che caratterizzano le pareti interne del cratere di Albano sono principalmente di tipo idromagmatico, mentre la costa del lago è caratterizzata da depositi alluvionali e colluviali. L'analisi geomorfologica delle pareti interne subaeree del cratere, effettuata tramite rilievi di campagna e interpretazione di foto aeree, mostra differenti tipi di frane che si formano nelle differenti porzioni del lago. Le frane da crolli e cadute di massi si trovano principalmente lungo le pendici dell'area meridionale e orientale del lago, con volumi massimi di  $10^2 \text{ m}^3$ . I fenomeni di scorrimento di detriti (*debris flow*) interessano principalmente la parte a nord e sud-ovest del lago, con volumi decisamente maggiori fino a centinaia di  $\text{m}^3$  [Bozzano et al., 2009].

Lo strato roccioso idromagmatico rappresenta la superficie di scorrimento dei depositi di copertura. L'innescò dello scorrimento è in funzione dell'inclinazione del pendio, di precipitazioni intense o di eventi sismici che potrebbero rompere l'equilibrio e accelerare il fenomeno. Nel 1997 e nel 2005, a seguito di eventi piovosi eccezionali, si sono verificate due frane di tipo debris flow dove i depositi di copertura eluviali-colluviali sono scivolati lungo corridoi morfologici preesistenti e, incanalandosi, hanno trascinato altri detriti aumentando il volume iniziale. Per esempio, nell'evento del 1997 il volume della frana è passato dai 300 m<sup>3</sup> iniziali a oltre migliaia di m<sup>3</sup> [Bozzano et al., 2009]. È interessante notare come nella parte meridionale del lago sia presente una forte pendenza marcatamente concava attribuibile a una nicchia di una grande frana che si riflette in una morfologia convessa appena sotto la linea di costa, interpretabile come l'accumulo dei detriti derivante dalla frana subaerea. La stima del volume di roccia distaccato calcolato tramite il modello digitale del terreno (DTM) è di circa  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup> [Bozzano et al., 2009].

Dall'interpretazione multi-temporale di foto aeree è stata monitorata l'attività delle frane all'interno del cratere. Il periodo di ritorno delle cadute di roccia varia tra 6 e 60 anni, mentre la riattivazione dei flussi di detriti avviene con un periodo di ritorno che varia da 5 a 30 anni [Bozzano et al., 2009].

L'analisi geomorfologica del Lago Albano è stata completata da Anzidei et al. [2008] attraverso un dettagliato rilievo batimetrico effettuato con strumentazione multibeam lungo le pendici interne sommerse del cratere, dato che sia l'impatto delle frane subaeree sull'acqua del lago sia gli eventi gravitativi subacquei devono essere tenuti da conto per una corretta valutazione del rischio da tsunami. Prodotto del lavoro è una batimetria ad alta risoluzione dell'area sommersa del cratere e una ricostruzione di dettaglio 2D e 3D in grado di rilevare e mappare anche i camini vulcanici di gas attivi [Esposito et al., 2006, Anzidei et al., 2007; Anzidei et al., 2008; Bozzano et al., 2009; Anzidei e Esposito, 2010].

Il modello digitale del terreno (DTM) del fondo del lago ha rivelato la morfologia del fondo del cratere, identificando almeno cinque crateri coalescenti e tre superfici pianeggianti principali connesse tra di loro da due scarpate, fornendo prove di importanti variazioni del livello del lago avvenute sino dalla sua formazione. Inoltre, Anzidei et al. [2008] hanno stimato il volume attuale dell'acqua e il valore totale di CO<sub>2</sub> disciolta per valutare la possibilità di un evento simile a quello accaduto a Nyos [Barberi et al., 1989].

Diversi settori della parte sommersa del Lago Albano sono caratterizzati dalla presenza di morfologie negative e positive che rappresentano un'interruzione più o meno brusca della continuità morfologica delle pareti dei diversi crateri. Queste forme concave e convesse mostrano caratteristiche variabili in termini di geometria, angolo di inclinazione, evidenze di freschezza delle frane e distribuzione spaziale, con spessore del materiale raramente superiore ai 10 m [Bozzano et al., 2009].

La maggiore parte delle pendenze più acclivi sono localizzate ai bordi del cratere più recente del Lago Albano, quello centrale e più profondo.

È da notare che nel contesto del Lago Albano la morfologia originale delle forme subacquee è meglio conservata rispetto a quella delle forme subaeree [Bozzano et al., 2009]. Infatti, la morfologia delle frane subacquee è notevolmente più chiara se confrontata con quella delle analoghe frane subaeree, che sono quasi sempre ricoperte da una ricca vegetazione e sono state soggette a fenomeni erosivi e deposizionali dovuti alle acque dilavanti e all'attività antropica.

Ai fenomeni franosi è stata attribuita una velocità di movimento che va da moderata a molto rapida ed estremamente rapida. Questo vale principalmente per le frane subaeree, in quanto per quelle subacquee è difficile quantificare la velocità dei blocchi o dei flussi quando entrano in acqua [Bozzano et al., 2009].

In sintesi, in base alla classificazione di Cruden e Varnes [1996] e di Mulder e Cochonat [1996],

all'interno del cratere del Lago Albano possiamo distinguere le seguenti forme:

#### Forme poligonali subaeree

- Alluvial fan
- Complex origin fan
- Rockfall/Topple debris
- Rockslide accumulation
- Talus deposit

#### Forme lineari subaeree

- Complex landslide scar
- Drainage line
- Debris flow channel.
- Debris flow scar
- Rockfall/Topple scarp
- Rockslide scar

#### Forme lineari subacquee

- Flow channel
- Landslide scarp
- Rockfall/Topple scarp
- Supposed tension crack

#### Forme poligonali subacquee

- Block field
- Isolated large rock block
- Subaqueous landslide accumulation
- Submerged prosecution of subaerial debris accumulation

Infine, sono da ricordare le misure sulla deformazione del suolo disponibili grazie alla rete trigonometrica installata dall'IGM nel 1951 e ad altri caposaldi di livellazione messi alla fine del secolo scorso, che indicano un sollevamento del suolo di 30 cm in 43 anni, con un tasso di 0.7 cm l'anno [Amato e Chiarabba, 1995].

## 2. Cartografia

### 2.1 Cartografia di base

Per effettuare un'analisi di suscettibilità alle frane di un'area è importante che la base cartografica utilizzata per il riporto delle informazioni sia recente e aggiornata e che contenga informazioni altimetriche dettagliate e affidabili. È inoltre importante che le informazioni sullo *stato della natura* (litologia, uso del suolo, ecc.) e sulla distribuzione degli elementi a rischio siano cartografate su mappe compatibili, per metodologia di rilevamento, scala e dettaglio, con le carte utilizzate per il riporto delle informazioni sui movimenti franosi.

Purtroppo, le informazioni reperite in letteratura per l'analisi della pericolosità di frana dei versanti interni del Lago Albano hanno basi topografiche di riferimento eterogenee di epoche diverse, con scala e dettaglio differenti. Per uniformare le informazioni raccolte, per l'analisi è stata scelta come cartografia di base per l'area subaerea la Carta tecnica regionale (CTR) numerica alla scala 1:5.000 nel formato TIF e il modello digitale del terreno in formato DXF

prodotti dalla Regione Lazio, mentre per la parte sommersa del cratere sono stati utilizzati i dati batimetrici digitali in formato ASC di Anzidei et al. [2008].

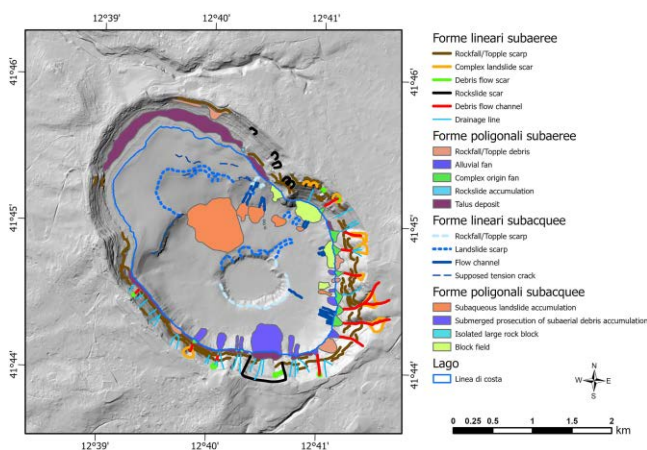
Sia il DXF della Regione Lazio, contenente una matrice di punti equidistanziati con passo di 5 metri, sia il file ASC di Anzidei et al. [2008] contenente una matrice di punti equidistanziati con passo di 1 metro, sono stati interpolati utilizzando le funzionalità dei *terrain dataset* di ArcGIS Pro della Esri, uno dei due software GIS utilizzati per l'analisi. I due modelli digitali del terreno raster risultanti, cioè quello subaereo della Regione Lazio e quello derivato dalla batimetria del lago, sono stati poi fusi in un unico DTM dell'area di studio con risoluzione di 5 m.

I dati di frana reperiti in letteratura provengono da due fonti principali: i tematismi subaerei del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) forniti dall'ABDAC, l'Autorità di Bacino del Distretto idrografico dell'Appennino Centrale (ex Autorità di bacino del Fiume Tevere), prodotti sulla base della Carta tecnica regionale alla scala 1:10.000, e le mappe incluse nei lavori sulla geomorfologia subaerea e subacquea dei versanti interni del Lago Albano, rispettivamente di Bozzano et al. [2009] e Mazzanti et al. [2007], che sono state disegnate su una base cartografica non riconosciuta.

I layer del PAI sono stati forniti nel formato SHP e comprendono il Rischio di frana, l'Inventario delle frane e la Pericolosità di frana. Il minore dettaglio delle informazioni ha fatto però preferire gli elementi di frana areali e lineari presenti nelle mappe analogiche dei lavori di Bozzano et al. [2009] e Mazzanti et al. [2007], che sono stati quindi georeferenziati, digitalizzati, opportunamente codificati e utilizzati nel presente lavoro.

La presenza di basi topografiche di riferimento non riconosciute dei due lavori ha posto notevoli problemi di congruità delle informazioni e quindi le forme di frana di entrambi i prodotti sono state riadattate seguendo la morfologia del DTM subaereo e subacqueo dell'area di studio.

Inoltre, i possibili errori di posizionamento delle frane cartografate (Figura 1), che possono sempre essere presenti a seconda della tecnica utilizzata per la mappatura dei vari eventi, potrebbero propagarsi ulteriormente durante le varie fasi dell'analisi, alterando quelli che sono i risultati ottenuti [Steger et al., 2016].



**Figura 1** Mappa con le forme di frana dei versanti interni del Lago Albano.

*Figure 1* Map distribution of landslide of different dynamic types over the internal slopes of the Lake Albano.

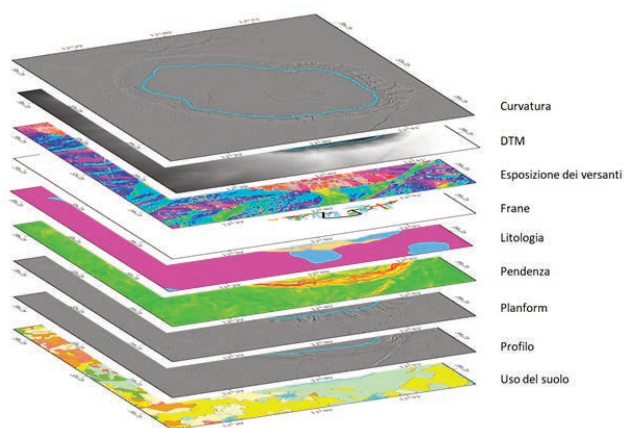
## 2.2 Cartografia tematica

Come tematismi a supporto dell'analisi di regressione e del rapporto empirico di verosimiglianza descritti nel seguente paragrafo, tra tutta la cartografia reperita in letteratura sono stati utilizzati solo i layer con una scala e un dettaglio idonei all'area di studio: la Carta dell'Uso del suolo digitale prodotta dalla Regione Lazio nell'ambito del Programma CORINE Land Cover nel 2016, con scala di rappresentazione 1:10.000 e attributo descrittivo *liv\_2\_desc*; la Carta Geologica regionale



informatizzata del 2012, con scala di rappresentazione 1:25.000, attributo descrittivo *litologia* e con base topografica della Carta Tecnica Regionale 1:10.000 edizione 1990-1991 [Praturlon et al., 2002]; il raster DTM descritto nel paragrafo 1.3.1 e i derivati di quest'ultimo: Planform, Profile e Curvature, che forniscono un indice di erosione e deposizione (per una descrizione dettagliata dei layer vedi <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/curvature-function.htm>), la pendenza calcolata in gradi Slope e l'esposizione dei versanti Aspect (direzione verso cui è rivolta ogni cella del DTM calcolata in gradi a partire dal nord).

**Figura 2** Tematismi, in ordine alfabetico, utilizzati per l'analisi di regressione e del rapporto empirico di verosimiglianza.  
**Figure 2** Layers used for the Regression and the Empirical Likelihood Ratio analyses, listed in alphabetical order.



Le mappe di dettaglio dei tematismi utilizzati nell'analisi di regressione e nell'analisi ELR sono riportate nell'Appendice A.

### 3. Studio della predisposizione dei versanti ai movimenti di massa

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di identificare e spiegare i fattori che influenzano maggiormente i movimenti franosi nell'area del lago Albano. Si è seguita una procedura in quattro passaggi: a) Analisi esplorativa di regressione, che valuta in modo semiautomatizzato tutte le combinazioni tra le variabili indipendenti candidate e indica in forma diagrammatica quelle chiave che meglio spiegano la variabile dipendente; b) Analisi di regressione *Ordinary Least Squares*, che fornisce informazioni sull'idoneità del modello adottato; c) Rapporto empirico di verosimiglianza ELR (*Empirical Likelihood Ratio*), applicato da Chung e Fabbri [2004] allo studio della predisposizione dei versanti ai movimenti di massa con STM (Spatial Target Mapping) [Fabbri et al., 2017b], un software per dati raster per lo sviluppo di modelli spaziali predittivi sviluppato dalla SpatialModels Inc.; d) Validazione incrociata per la validazione dei pattern di predizione generati da ELR.



**Figura 3** Flusso di lavoro della metodologia applicata.  
**Figure 3** Workflow of the applied methodology.

### 3.1 L'equazione di regressione

L'analisi di regressione permette di modellare, esaminare ed esplorare nello spazio e nel tempo le relazioni spaziali tra gli oggetti in un'area di studio. È una tecnica usata per analizzare un insieme di dati che consistono in una *variabile dipendente*  $y$  (il processo che si vuole spiegare) e una o più *variabili indipendenti*  $x$  (i processi che spiegano la variabile dipendente). Lo scopo è quello di stimare un'eventuale relazione funzionale esistente tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti. La variabile dipendente nell'equazione di regressione è una funzione delle variabili indipendenti più un termine d'errore (*residui*)  $\varepsilon$ . Quest'ultimo è una variabile casuale e rappresenta una variazione non controllabile e imprevedibile nella variabile dipendente.

$$y = \beta + \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

**Figura 4** Elementi di un'equazione di regressione.

**Figure 4** Elements of a regression equation.

I coefficienti  $\beta$  sono dei valori di ogni variabile indipendente che rappresentano la forza e la direzione della relazione che la variabile indipendente ha con la variabile dipendente. Il coefficiente  $\beta_0$  (*intercetta*) rappresenta il valore che la variabile dipendente avrebbe se tutte le variabili indipendenti fossero uguali a zero.

Uno dei metodi più comunemente utilizzati per ottenere le migliori stime è il *metodo dei minimi quadrati OLS (Ordinary Least Squares)*, che produce un insieme di dati diagnostici e statistici che permettono di interpretare i risultati e risolvere eventuali problemi del modello.

### 3.2 Analisi esplorativa di regressione con lo strumento Exploratory Regression

Lo strumento *Exploratory Regression (ER)* di ArcGIS Pro esplora i dati e aiuta a identificare le potenziali variabili indipendenti che contribuiscono a spiegare meglio la variabile dipendente che si cerca di modellare, nel nostro caso gli eventi franosi. ER è uno strumento di *data mining* che effettua tutte le possibili combinazioni delle variabili indipendenti candidate migliorando la possibilità di identificare il modello che soddisfa tutti i requisiti e gli assunti del metodo OLS. ER esegue anche lo strumento Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) che analizza i residui. I risultati dello strumento Exploratory Regression permettono quindi di identificare i modelli che spiegano meglio la variabile dipendente nel contesto dei criteri specificati e permettono di capire se le informazioni raccolte sono sufficienti per spiegare il fenomeno che si sta modellando e se i risultati dell'analisi OLS possono essere considerati attendibili o meno.

Lo strumento restituisce inoltre vari parametri diagnostici e statistici, tra i quali i più importanti sono:

#### Valore p (p-value)

Test statistico che calcola la probabilità  $p$  per i coefficienti associati a ogni variabile indipendente. Piccoli valori  $p$  indicano che una variabile indipendente è importante per il modello. Per esempio, un coefficiente con un valore  $p$  uguale a 0.01 indica un livello di significatività (o *livello di confidenza*) del 99 per cento.

#### Coefficiente di determinazione $R^2$ (R quadro)

Valore statistico derivato dall'equazione di regressione che quantifica le bontà (*performance*) del

modello, cioè misura la forza della relazione lineare tra le variabili indipendenti inserite nel modello di regressione e la variabile dipendente. Il valore  $R^2$  va da 0 a 1 e il modello con il valore maggiore sarà quello che avrà minori discrepanze tra i valori osservati della variabile dipendente  $y$  e quelli attesi. Una limitazione di  $R^2$  è che il valore aumenta ogni volta che si aggiunge una variabile indipendente al modello, anche se questa variabile non è per nulla esplicativa. Per evitare questa situazione, nei modelli di regressione con molte variabili indipendenti si preferisce interpretare il valore  **$R^2$  corretto** (Adjusted  $R^2$ ) che è generalmente più basso di  $R^2$ .

#### Fattore di inflazione della varianza VIF (Variance Inflation Factor)

Fattore che misura la ridondanza tra le variabili indipendenti. Le variabili indipendenti con un valore VIF superiore a 7.5 dovrebbero essere rimosse dal modello di regressione.

#### Valore p di Jarque-Bera

Valore che indica se i residui hanno una distribuzione normale. Se la distribuzione non è normale, il modello è affetto da errore (*bias*). Se è presente anche una correlazione spaziale dei residui, l'errore potrebbe essere il risultato di specifiche errate del modello, cioè potrebbe mancare una variabile chiave.

#### Test statistico di Koenker BP (test studentesco Breusch-Pagan di Koenker)

Test che determina se le variabili indipendenti hanno una relazione consistente con la variabile dipendente sia nello spazio geografico sia in quello dei dati. Quando il modello è consistente nello spazio geografico, i processi spaziali rappresentati dalle variabili indipendenti hanno lo stesso comportamento (sono *stazionari*) in tutta l'area di studio e l'equazione è quindi la stessa per tutta l'area. Quando il modello è consistente nello spazio dei dati, le variazioni nella relazione tra i valori predetti e ciascuna variabile indipendente non cambiano a seconda della grandezza della variabile indipendente, cioè non c'è eteroschedasticità nel modello. Per esempio, se dobbiamo predire i movimenti franosi e una delle variabili indipendenti è la piovosità, il modello ha problemi di eteroschedasticità se le predizioni sono più accurate per le aree con piovosità bassa e meno accurate per le aree con piovosità alta.

Per individuare il modello OLS più idoneo per l'area di studio, lo strumento ER è stato dapprima eseguito per le forme subaeree lineari FLT e poligonali FPT, poi per le forme subacquee lineari FLA e poligonali FPA. Come variabili esplicative (o indipendenti) sono stati usati i layer **U, L, a, d, s, c, p, f** (Tabella 1).

Per effettuare un'analisi di regressione ArcGIS Pro utilizza come input per la variabile dipendente un layer puntuale e pertanto sono stati effettuati tre test per identificare la metodologia migliore per rappresentare gli elementi lineari e poligonali delle frane con oggetti puntuali che fossero rappresentativi dei fenomeni cartografati. Nel primo test, ogni linea dei layer FLT e FLA (vedi Tabella 1) è stata rappresentata con il punto mediano della linea stessa, in generale quello con quote più elevate, mentre i poligoni dei layer FPT e FPA (vedi Tabella 1) sono stati rappresentati dal loro centroide. Nel secondo test, sono stati utilizzati tutti i vertici sia degli elementi lineari sia dei perimetri delle forme poligonali. Nel terzo e ultimo test, si è cercato di emulare la metodologia utilizzata dal software STM, che necessita di layer raster come input. I layer vettoriali degli elementi lineari e poligonali sono stati quindi trasformati in layer raster, dove ogni fenomeno franoso è stato rappresentato da un insieme di celle contigue. I centroidi delle celle sono stati poi convertiti in oggetti vettoriali puntuali, utilizzati infine come input da ArcGIS Pro nell'analisi ER e OLS.

Il primo test non ha portato a un risultato soddisfacente, molto probabilmente perché il vertice con quota più elevata in buona parte dei casi non corrispondeva al punto che aveva dato origine alla frana. Inoltre, i centroidi dei poligoni erano spesso molto distanti dalla testa della frana. Nel



secondo test si sono ottenuti risultati soddisfacenti per gli elementi lineari, mentre i vertici delle forme poligonali si sono rivelati inadatti in quanto rappresentativi solo del perimetro dell'area di frana. Si è deciso pertanto, anche per motivi di congruità, di utilizzare lo stesso tipo di input usato nel modello ELR e quindi usare i centroidi dei layer raster del terzo test, che hanno tra l'altro portato ai risultati più soddisfacenti nell'analisi esplorativa con lo strumento ER.

| Forme lineari subaeree FLT |                        | Forme poligonali subaeree FPT |                        |
|----------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| LT1                        | Debris flow channel    | PT1                           | Alluvial fan           |
| LT2                        | Debris flow scar       | PT2                           | Complex origin fan     |
| LT3                        | Drainage line          | PT3                           | Rockfall topple debris |
| LT4                        | Rockfall topple scarp  | PT4                           | Rockslide              |
| LT5                        | Complex landslide scar | PT5                           | Talus deposits         |
| LT6                        | Rockslide scar         |                               |                        |

| Forme lineari subacquee FLA |                        | Forme poligonali subacquee FPA |   |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| LA1                         | Flow channel           | PA1                            | Block field                                     |
| LA2                         | Landslide scarp        | PA2                            | Isolated rock block                             |
| LA3                         | Rockfall topple scarp  | PA3                            | Subaqueous landslide accumulation               |
| LA4                         | Supposed tension crack | PA4                            | Submerged prosecution of subaerial accumulation |

| Layer di supporto (Variabili indipendenti) |   |
|--|---|
| Ux   | Uso del suolo (x va da 1 a 11 per ogni tipo di uso del suolo) |
| Lx   | Litologia (x va da 1 a 6 per ogni tipo di litologia)          |
| a  | Aspect (Esposizione dei versanti)                             |
| d  | DTM   |
| s  | Slope (Pendenza)  |
| c  | Curvature (Curvatura)   |
| p  | Profile (Profilo)   |
| f  | Planform  |

**Tabella 1** Elenco e codice identificativo delle variabili dipendenti e indipendenti incluse nei modelli OLS ed ELR.  
**Table 1** ID codes list of the dependent and independent variables of the OLS and ELR models.

Di seguito sono riportati i risultati dello strumento Exploratory Regression.

### Forme lineari subaeree

$R^2$  corretto per le forme lineari subaeree, che rappresentano per la maggiore parte i bordi delle nicchie di distacco, ha valori estremamente bassi (0.01-0.07) per le varie combinazioni di variabili indipendenti. Solo **d**, **s**, **f** sembrano spiegare il modello, insieme a **U**. I valori di **f** indicano una concavità in senso longitudinale del pendio. Il valore basso di **L** è dovuto molto probabilmente al fatto che la litologia è troppo generalizzata per la scala dell'analisi. Le variabili indipendenti **c**, **p** creano invece una multicollinearità, cioè sono variabili ridondanti e non apportano alcun miglioramento al modello. Quest'ultimo risultato era prevedibile, in quanto la variabile indipendente Curvature è la combinazione delle variabili Planform e Profile. Curvature è stata

inserita appositamente in modo da testare al meglio lo strumento ER, ma non sarà utilizzata nell'analisi di regressione OLS.

| Significatività delle variabili |                  |           |           | Multicollinearità |      |            |                   |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|------|------------|-------------------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva | Variabile         | VIF  | Violazioni | Covariate         |
| Litologia                       | 0.00             | 43.62     | 56.38     | Litologia         | 1.73 | 0          |                   |
| Usosuolo                        | 0.00             | 0.00      | 100.00    | Usosuolo          | 1.03 | 0          |                   |
| DTM                             | 0.00             | 0.00      | 100.00    | DTM               | 1.59 | 0          |                   |
| Slope                           | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Slope             | 1.04 | 0          |                   |
| Aspect                          | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Aspect            | 1.39 | 0          |                   |
| Curvature                       | 0.00             | 68.67     | 31.33     | Curvature         | 8.39 | 26         | Profile (60.47)   |
| Profile                         | 0.00             | 90.36     | 9.64      | Profile           | 8.39 | 26         | Curvature (60.47) |
| Planform                        | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Planform          | 2.24 | 0          |                   |

**Tabella 2** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme lineari subaeree.  
*Table 2 Results of the Exploratory regression tool for the linear subaerial forms.*

### Forme lineari subacquee

Per le Forme lineari subacquee FLA sono stati esclusi logicamente i layer dell'uso del suolo **U** e della litologia **L**. Significatività 100% solo per il DTM **d**, molto probabilmente a causa dell'esiguo numero di punti utilizzati come input.  $R^2$  corretto massimo uguale a circa 0.22.

| Significatività delle variabili |                  |           |           | Multicollinearità |      |            |                   |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|------|------------|-------------------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva | Variabile         | VIF  | Violazioni | Covariate         |
| DTM                             | 100.00           | 0.00      | 100.00    | DTM               | 1.02 | 0          |                   |
| Slope                           | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Slope             | 1.06 | 0          |                   |
| Aspect                          | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Aspect            | 1.01 | 0          |                   |
| Curvature                       | 0.00             | 50.00     | 50.00     | Curvature         | 8.47 | 8          | Profile (50.00)   |
| Profile                         | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Profile           | 8.64 | 8          | Curvature (50.00) |
| Planform                        | 0.00             | 100.00    | 0.00      | Planform          | 5.14 | 0          |                   |

**Tabella 3** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme lineari subacquee.  
*Table 3 Results of the Exploratory regression tool for the linear sub-aqueous forms.*

### Forme lineari subaeree e subacquee

Si è provato infine a mettere insieme sia le forme lineari subaeree sia quelle subacquee. Nel loro insieme tutte le forme lineari e tutte le variabili indipendenti disponibili hanno portato a un  $R^2$  corretto massimo uguale a 0.05 e un'alta significatività per **d**, **s**, **f**, **U**.

È stato effettuato anche un test eliminando **U** e **L**, non presenti nell'area sommersa.  $R^2$  corretto sale a 0.60. **U** e **L** quindi disturbano il modello utilizzando sia le forme di frana subaeree e subacquee, molto probabilmente in quanto i valori sono presenti solo in una parte dell'area di analisi.

| Significatività delle variabili |                  |           |           | Multicollinearità |      |            |                   |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|------|------------|-------------------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva | Variabile         | VIF  | Violazioni | Covariate         |
| DTM                             | 100.00           | 0.00      | 100.00    | Litologia         | 1.73 | 0          |                   |
| Slope                           | 100.00           | 100.00    | 0.00      | Usosuolo          | 1.03 | 0          |                   |
| Planform                        | 100.00           | 100.00    | 0.00      | DTM               | 1.59 | 0          |                   |
| Usosuolo                        | 87.23            | 0.00      | 100.00    | Slope             | 1.04 | 0          |                   |
| Curvature                       | 62.65            | 68.67     | 31.33     | Aspect            | 1.38 | 0          |                   |
| Profile                         | 62.65            | 100.00    | 0.00      | Curvature         | 8.44 | 26         | Profile (60.47)   |
| Litologia                       | 43.62            | 72.34     | 27.66     | Profile           | 8.43 | 26         | Curvature (60.47) |
| Aspect                          | 3.19             | 62.77     | 37.23     | Planform          | 2.25 | 0          |                   |

**Tabella 4** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme lineari subacquee e subaeree.  
**Table 4** Results of the Exploratory regression tool for linear subaerial and sub-aqueous forms.

### Forme poligonali subaeree

I risultati dello strumento ER hanno evidenziato in questo caso che **U**, **L**, **d**, **a**, **s**, con significatività variabile, aiutano il modello, mentre i valori di convessità e concavità longitudinale **f** e trasversale **p** hanno una minore influenza.  $R^2$  corretto attorno a 0.54 per la combinazione **L**, **U**, **d**, **a**, **s**.

| Significatività delle variabili |                  |           |           | Multicollinearità |       |            |                   |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|-------|------------|-------------------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva | Variabile         | VIF   | Violazioni | Covariate         |
| Litologia                       | 100.00           | 100.00    | 0.00      | Litologia         | 1.80  | 0          |                   |
| Usosuolo                        | 100.00           | 100.00    | 0.00      | Usosuolo          | 1.44  | 0          |                   |
| DTM                             | 100.00           | 100.00    | 0.00      | DTM               | 1.66  | 0          |                   |
| Aspect                          | 100.00           | 100.00    | 0.00      | Aspect            | 1.06  | 0          |                   |
| Slope                           | 100.00           | 100.00    | 0.00      | Slope             | 1.50  | 0          |                   |
| Profile                         | 75.90            | 4.82      | 95.18     | Profile           | 10.02 | 26         | Curvature (60.47) |
| Curvature                       | 66.27            | 71.08     | 28.92     | Planform          | 3.07  | 0          |                   |
| Planform                        | 55.42            | 31.33     | 68.67     | Curvature         | 10.08 | 26         | Profile (60.47)   |

**Tabella 5** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme poligonali subaeree.  
**Table 5** Results of the Exploratory regression tool for the polygonal subaerial forms.

### Forme poligonali subacquee

In funzione dei dati acquisiti in letteratura per le forme poligonali subacquee [Mazzanti et al., 2007], che cartografano gli accumuli di frana subacquei, i pattern di predizione prodotti dalle analisi di STM saranno pertanto relativi alle condizioni di accumulo. Tuttavia, i risultati ottenuti sono analoghi a quelli delle Forme poligonari subaeree, con **d**, **a**, **s** che spiegano meglio il modello e **p** che apporta un maggiore contributo rispetto a **f**.  $R^2$  corretto massimo uguale a circa 0.55.

| Significatività delle variabili |                  |           |           |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva |
| DTM                             | 100.00           | 0.00      | 100.00    |
| Aspect                          | 100.00           | 0.00      | 100.00    |
| Slope                           | 100.00           | 0.00      | 100.00    |
| Profile                         | 91.67            | 50.00     | 50.00     |
| Curvature                       | 91.67            | 58.33     | 41.67     |
| Planform                        | 66.67            | 66.67     | 33.33     |

| Multicollinearità |      |            |           |
|-------------------|------|------------|-----------|
| Variabile         | VIF  | Violazioni | Covariate |
| DTM               | 3.68 | 0          |           |
| Aspect            | 1.01 | 0          |           |
| Slope             | 3.82 | 0          |           |
| Profile           | 5.28 | 0          |           |
| Curvature         | 4.34 | 0          |           |
| Planform          | 5.11 | 0          |           |

**Tabella 6** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme poligonali subacquee.

*Table 6 Results of the Exploratory regression tool for the polygonal sub-aqueous forms.*

### Forme poligonali subaeree e subacquee

Non si è potuto analizzare insieme le forme poligonali subaeree e subacquee, come è stato fatto per le forme lineari, dato che le forme subaeree rappresentano le aree di distacco, mentre quelle subacquee sono principalmente relative ai corpi di accumulo. I due gruppi di frane sono stati quindi analizzati solo separatamente.

### Forme lineari e poligonali subaeree e subacquee

Tenendo conto delle limitazioni descritte in precedenza, è stato tuttavia effettuato un ulteriore test usando contemporaneamente i punti che rappresentano le forme lineari e quelle poligonali sia subaeree sia subacquee.  $R^2$  corretto ha raggiunto il valore massimo di 0.26. La significatività delle variabili indipendenti è elevata, tranne per **p**, concavità e convessità in senso trasversale. In quest'ultimo test la curvatura **c** non è stata utilizzata.

| Significatività delle variabili |                  |           |           |
|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|
| Variabile                       | %Significatività | %Negativa | %Positiva |
| Litologia                       | 100.00           | 100.00    | 0.00      |
| Usosuolo                        | 100.00           | 54.39     | 45.61     |
| DTM                             | 100.00           | 100.00    | 0.00      |
| Slope                           | 100.00           | 100.00    | 0.00      |
| Planform                        | 100.00           | 0.00      | 100.00    |
| Aspect                          | 92.98            | 7.02      | 92.98     |
| Profile                         | 47.37            | 14.04     | 85.96     |

| Multicollinearità |      |            |           |
|-------------------|------|------------|-----------|
| Variabile         | VIF  | Violazioni | Covariate |
| Litologia         | 1.53 | 0          |           |
| Usosuolo          | 3.11 | 0          |           |
| DTM               | 3.64 | 0          |           |
| Aspect            | 1.02 | 0          |           |
| Slope             | 1.39 | 0          |           |
| Profile           | 1.47 | 0          |           |
| Planform          | 1.47 | 0          |           |

**Tabella 7** Risultati dello strumento Exploratory Regression per le forme lineari e poligonali subaeree e subacquee.

*Table 7 Results of the Exploratory regression tool for the linear and polygonal subaerial and sub-aqueous forms.*

Dall'analisi esplorativa di regressione appare quindi chiaro che le variabili indipendenti che spiegano meglio il modello sono la Litologia **L**, l'Uso del suolo **U**, il DTM **d**, l'Esposizione dei versanti **a**, la Pendenza **s**. Il Profilo **p** e Planform **f** in generale spiegano meno il modello, con alti valori di significatività solo per specifiche geometrie di forme di frana. La curvatura **c**, invece, è un valore ridondante essendo la somma di **p** e **f** e non dovrebbe essere inclusa nel modello.

Nell'analisi di regressione vera e propria usando il metodo gaussiano Ordinary Least Squares, che permette di valutare se i risultati ottenuti con l'analisi di regressione esplorativa possano essere considerati affidabili o meno, è stato tenuto conto dei risultati ottenuti dallo strumento Exploratory Regression.

### 3.3 Analisi di regressione Ordinary Least Squares

L'analisi di regressione Ordinary Least Squares (OLS) è la tecnica di regressione maggiormente utilizzata ed è il punto di partenza per tutte le analisi di regressione spaziali. OLS fornisce un modello globale del processo che si cerca di comprendere o predire e crea una singola equazione di regressione valida per tutta l'area di analisi. Il rapporto che viene restituito dallo strumento contiene numerosi elementi di diagnosi che permettono di interpretare e correggere i risultati. Tuttavia, OLS è uno strumento affidabile solo se i dati e se il modello di regressione soddisfano i requisiti richiesti dalla metodologia, che permettono di valutare se la regressione è un metodo idoneo di analisi, visti la struttura dei dati e il modello implementato.

I layer che sono stati utilizzati come variabili indipendenti nell'analisi OLS sono quelli identificati dallo strumento Exploratory Regression: la Litologia **L**, l'Uso del suolo **U**, il DTM **d**, l'Esposizione dei versanti **a**, la Pendenza **s**, Profilo **p** e Planform **f**.

Il risultato dell'analisi di regressione ha identificato i fattori che influenzano maggiormente i movimenti franosi nell'area di studio e queste informazioni saranno utilizzate nell'analisi predittiva con l'algoritmo del rapporto empirico di verosimiglianza ELR (*Empirical Likelihood Ratio*) proposto da Chung e Fabbri [2004], che indicherà la predisposizione dei versanti ai movimenti franosi.

La Tabella 8 mostra come esempio il risultato dello strumento Ordinary Least Squares, eseguito utilizzando come input tutte le forme lineari e poligonali, sia subaeree sia subacquee.

I rapporti dello strumento OLR per i singoli tipi di frana lineari e poligonali, subaeree e subacquee, mostrano che tutte le variabili indipendenti sono importanti per il modello (*Probability [b]*) e che non sono presenti multicollinearità, cioè ridondanze tra di loro (*VIF [c]*). Tuttavia, l'apporto delle variabili indipendenti Profilo **p** e Planform **f** andrebbe ulteriormente analizzato. Il valore statistico di Koenker (*Koenker BP Statistic [f]*) indica che sono presenti variazioni regionali statisticamente significative. L'utilizzo dello strumento Geographically Weighted Regression che, a differenza di OLR, è adatto a modellare relazioni che variano spazialmente, potrebbe aiutare a migliorare il modello e la predizione.

Tuttavia, il valore statistico di Jarque-Bera (*Jarque-Bera Statistic [g]*), statisticamente significativo in tutti i rapporti, indica **specifiche errate nei modelli che li rendono quindi inaffidabili**. La distribuzione non normale dei residui mostra che nei modelli mancano delle variabili indipendenti chiave, la cui assenza impedisce di spiegare completamente il fenomeno che si sta indagando.

Inoltre, il messaggio di avviso alla fine di ogni rapporto suggerisce di utilizzare lo strumento Spatial Autocorrelation (Moran's I) per accertarsi che i residui non siano aggregati. Dai risultati dello strumento, che confermano l'aggregazione dei residui (Figura 3), si ha la prova che il modello manca di alcune variabili indipendenti essenziali. Tra queste potrebbero quasi sicuramente migliorare il modello sia la permeabilità delle varie litologie, sia le informazioni idrogeologiche sulla falda, che **non sono state rinvenute in letteratura alla scala idonea per l'analisi**. La piovosità invece, essendo praticamente costante in tutta l'area di analisi, avrebbe un'influenza minima sui risultati. Anche una carta litologica più di dettaglio rispetto a quella utilizzata potrebbe migliorare i risultati dell'analisi di regressione.

| Summary of OLS Results |                 |          |             |                 |           |             |               |           |
|------------------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|-----------|-------------|---------------|-----------|
| Variable               | Coefficient [a] | StdError | t-Statistic | Probability [b] | Robust_SE | Robust_t    | Robust_Pr [b] | VIF [c]   |
| Intercept              | 248.762.617     | 0.449199 | 553.791.956 | 0.000000*       | 0.744848  | 333.977.667 | 0.000000*     | ----      |
| LITOLOGIA              | -0.321868       | 0.007145 | -45.049.834 | 0.000000*       | 0.011595  | -27.758.447 | 0.000000*     | 1.536.656 |
| USOSUOLO               | 0.171896        | 0.009097 | 18.894.898  | 0.000000*       | 0.013248  | 12.975.446  | 0.000000*     | 3.120.296 |
| DTM                    | -0.138601       | 0.002129 | -65.090.121 | 0.000000*       | 0.003656  | -37.914.363 | 0.000000*     | 3.645.189 |
| ASPECT                 | 0.007525        | 0.000707 | 10.639.830  | 0.000000*       | 0.000749  | 10.044.007  | 0.000000*     | 1.017.380 |
| SLOPE                  | -0.046295       | 0.006595 | -7.019.762  | 0.000000*       | 0.009814  | -4.717.387  | 0.000004*     | 1.394.655 |
| PROFILE                | 0.119601        | 0.014800 | 8.081.319   | 0.000000*       | 0.027155  | 4.404.396   | 0.000014*     | 1.473.704 |
| PLANFORM               | 0.215241        | 0.024537 | 8.772062    | 0.000000*       | 0.039816  | 5.405.831   | 0.000000*     | 1.471.964 |

| OLS Diagnostics             |                |   |                 |
|-----------------------------|----------------|---|-----------------|
| Input Features:             | LPAT_Totali    | Dependent Variable:                         | TIPO            |
| Number of Observations:     | 56017          | Akaiçs Information Criterion (AICc) [d]:    | 473.141.504.591 |
| Multiple R-Squared [d]:     | 0.261213       | Adjusted R-Squared [d]:                     | 0.261121        |
| Joint F-Statistic [e]       | 2829.020081    | Prob(>F), (7,56009) degrees of freedom:     | 0.000000*       |
| Joint Wald Statistic [e]:   | 6838.883819    | Prob(>chi-squared), (7) degrees of freedom: | 0.000000*       |
| Koenker (BP) Statistic [f]: | 5280.691694    | Prob(>chi-squared), (7) degrees of freedom: | 0.000000*       |
| Jarque-Bera Statistic [g]:  | 1092574.761234 | Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom: | 0.000000*       |

Notes on Interpretation

\* An asterisk next to a number indicates a statistically significant p-value ( $p < 0.01$ ).

[a] Coefficient: Represents the strength and type of relationship between each explanatory variable and the dependent variable.

[b] Probability and Robust Probability (Robust\_Pr): Asterisk (\*) indicates a coefficient is statistically significant ( $p < 0.01$ ); if the Koenker (BP) Statistic [f] is statistically significant, use the Robust Probability column (Robust\_Pr) to determine coefficient significance.

[c] Variance Inflation Factor (VIF): Large Variance Inflation Factor (VIF) values ( $> 7.5$ ) indicate redundancy among explanatory variables.

[d] R-Squared and Akaiçs Information Criterion (AICc): Measures of model fit/performance.

[e] Joint F and Wald Statistics: Asterisk (\*) indicates overall model significance ( $p < 0.01$ ); if the Koenker (BP) Statistic [f] is statistically significant, use the Wald Statistic to determine overall model significance.

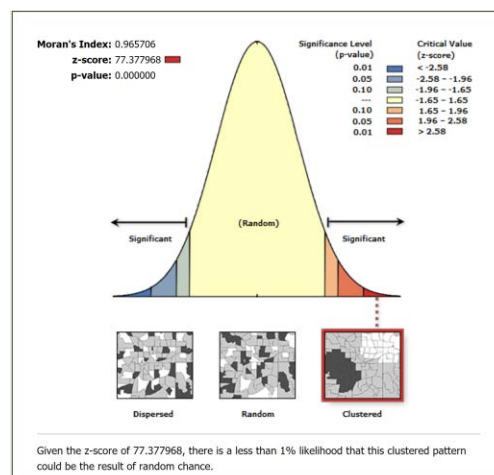
[f] Koenker (BP) Statistic: When this test is statistically significant ( $p < 0.01$ ), the relationships modeled are not consistent (either due to non-stationarity or heteroskedasticity). You should rely on the Robust Probabilities (Robust\_Pr) to determine coefficient significance and on the Wald Statistic to determine overall model significance.

[g] Jarque-Bera Statistic: When this test is statistically significant ( $p < 0.01$ ) model predictions are biased (the residuals are not normally distributed).

**WARNING 000851:** Use the Spatial Autocorrelation (Moran's I) Tool to ensure residuals are not spatially autocorrelated.

Tabella 8 Rapporto dello strumento Ordinary Least Squares.  
Table 8 Ordinary Least Squares tool report.

Figura 5 Rapporto dello strumento Spatial Autocorrelation (Global Moran's I).  
Figure 5 Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) tool report.



## 4. Il Rapporto empirico di verosimiglianza ELR

I modelli spaziali di predizione che utilizzano il Rapporto empirico di verosimiglianza ELR (*Empirical Likelihood Ratio*) sono basati sulla Funzione di favorabilità FF (*Favourability Function*), un quadro di modellazione matematica unificato proposto da Chung e Fabbri [1993] che permette di modellare le predizioni spaziali (vedi anche Chung [2006]).

Per esempio, per valutare una mappa contenente gli eventi di frana possiamo utilizzare una carta delle pendenze costruita a partire da un DTM. L'area di studio viene suddivisa in due sotto aree che non si sovrappongono, l'area che contiene le frane e quella che non le contiene. Supponiamo che i valori angolari della pendenza forniscano delle utili informazioni per identificare le frane e che in queste aree l'inclinazione abbia dei valori diversi da quelli delle altre aree. Questo ci suggerisce che la distribuzione della frequenza delle pendenze nell'area delle frane dovrebbe essere diversa da quella delle restanti aree dove le frane non sono presenti. La funzione di verosimiglianza, rapporto delle due funzioni di distribuzione delle frequenze, mette in evidenza queste differenze. Allo stesso modo, le frequenze normalizzate di un certo numero di categorie litologiche presenti nelle aree delle frane differiranno dalle frequenze normalizzate delle aree dove le frane non sono presenti, dimostrando che anche il layer con le informazioni litologiche fornisce utili informazioni per la predizione delle frane.

Il Rapporto empirico di verosimiglianza permette di valutare quali layer geoambientali e morfologici, tra quelli a disposizione, spiegano maggiormente la predisposizione al dissesto e permette anche di valutare la predisposizione dei versanti a essere interessati da fenomeni di instabilità di tipo dinamico specifico (per esempio, frane di scivolamento) e i differenti stati di attività (frane attive e quiescenti).

Il Rapporto empirico di verosimiglianza ELR è stato utilizzato in questo lavoro per stabilire le relazioni spaziali quantitative e per la modellazione predittiva. Possiamo considerare ELR sia come misura sia come funzione integratrice per la modellazione. Gli assunti teorici relativi a ogni passo del processo di modellazione sono descritti in dettaglio nei lavori di Chung [2006] e Fabbri e Patera [2021] e sono riassunti nei seguenti 10 passi:

1. L'area di studio viene suddivisa in due sub-aree:
  - a La sub-area corrispondente alla presenza di specifici tipi di occorrenze (per esempio, frane, valanghe, misure di inquinanti nel suolo o nella falda, ecc.), che devono essere congruenti tra di loro, così come le relative condizioni ambientali espresse dalle cartografie tematiche;
  - b La restante sub-area di studio in cui le occorrenze sono o assenti o non sono note, cioè non cartografate per mancanza di informazioni, ma per le quali si hanno le stesse cartografie tematiche.
2. La relazione spaziale tra ogni cella raster della sub-area con la presenza di occorrenze e la corrispondente cella di una carta tematica digitale di supporto che si presume possa rappresentare in parte le condizioni relative alle occorrenze che si stanno analizzando (uso del suolo, litologia, quota, pendenza, ecc.). Questa relazione è confrontata come rapporto relativo con la relazione della sub-area con assenza di occorrenze e la medesima carta tematica di supporto. La carta tematica digitale di supporto in corrispondenza della sub-area senza occorrenze, che generalmente è la parte più estesa dell'area di studio, può contenere anche occorrenze che non sono state identificate o cartografate, quindi non conosciute.
3. Per ogni cella dell'area di studio possiamo calcolare il rapporto di due rapporti relativi, tra la sub-area con occorrenze e quella senza occorrenze. Se i due rapporti sono identici, il risultato sarà uguale a 1. Se il rapporto al numeratore è il doppio di quello al denominatore, la frequenza relativa della carta tematica di supporto sarà uguale a 2. I valori di ELR vanno da un minimo di zero (0) a un massimo di infinito ( $\infty$ ): essi esprimono il confronto tra frequenze relative normalizzate.



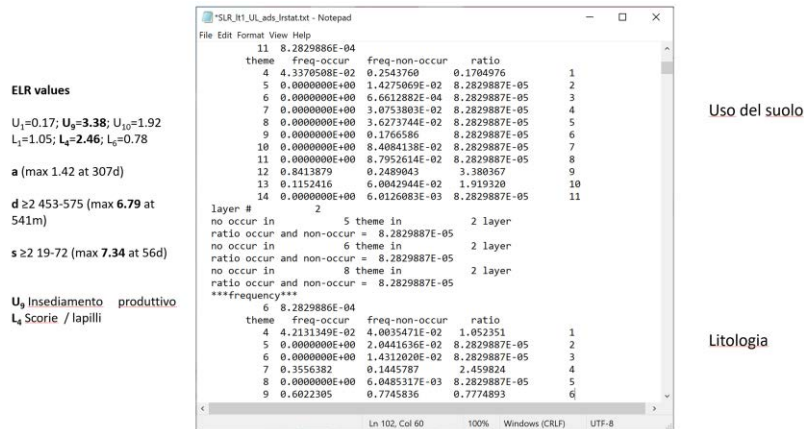
4. Per ciascuna carta tematica di supporto, che può contenere valori o discreti o continui, i rapporti relativi di ogni cella sono una misura di supporto alla seguente proposizione:  
 $P_i$  che una cella  $i$  nell'area di studio è affetta da uno specifico tipo di occorrenza |  
 (data) la presenza di evidenza cartografica.
5. L'immagine digitale della presenza di occorrenze di uno specifico tipo è considerata come *Pattern di supporto diretto* o DSP (*Direct Supporting Pattern*) della proposizione nel passo 4, equivalente della variabile dipendente dell'equazione di regressione, mentre la presenza delle classi o dei valori delle carte tematiche in corrispondenza delle occorrenze è considerato come *Pattern di supporto indiretto* o ISP (*Indirect Supporting Pattern*), equivalente della variabile indipendente dell'equazione di regressione. Per *supporto* si intende quello della proposizione al punto 4, da stabilire come vera.
6. Si può usare un valore arbitrario sperimentale di  $ELR \approx 2$  per separare i valori di ELR influenti da quelli non influenti sulla proposizione (che può essere o vera o falsa). Questo valore soglia può essere affinato nei passaggi successivi dell'analisi.
7. È possibile generare istogrammi di frequenze normalizzate per tutte le carte tematiche digitali di supporto ISP rappresentati da mappe categoriche (per esempio, uso del suolo o litologia) in relazione a un dato tipo di occorrenza. Possiamo anche generare funzioni di densità per tutti i valori delle mappe con valori continui come la quota e la pendenza.
8. Se abbiamo due carte categoriche (per esempio, uso del suolo e litologia) e tre mappe digitali con valori continui (esposizione dei versanti in gradi, quota in metri e pendenza in gradi) in corrispondenza di ogni cella della sub-area con occorrenze e della sub-area senza occorrenze, avremo cinque valori di rapporto ELR che dovranno essere integrati (combinati) in un unico valore significativo. Una delle metodologie è quella di interpretarli come *valori di verosimiglianza* usando le regole combinatorie del modello di funzione di verosimiglianza empirica. Esistono anche altre interpretazioni del rapporto, come quella dei *fuzzy set*, la *funzione di appartenenza dei fuzzy set* con le relative regole combinatorie e altre descritte nei lavori di Chung e Fabbri [1993] e Fabbri et al. [2017a].
9. I valori integrati della funzione ELR sono compresi tra 0 e  $\infty$  (in un'immagine di predizione) e, ai fini di un'analisi, per essere interpretabili e paragonabili devono essere trasformati in ranghi (in un pattern di predizione). I valori vengono ordinati da quello minimo a quello massimo. Sono poi costruiti ranghi di area uguale, ciascuno corrispondente a un'estensione di area di studio. Sperimentalmente, si è stabilito di definire 200 ranghi, ciascuno corrispondente allo 0.5% dell'area di studio.
10. Per la visualizzazione e l'interpretazione dei risultati, si aggregano i ranghi di eguale area, relativi a celle con valori sequenziali, e si rappresentano con gradazioni di colori in mappe di pattern di predizione. I ranghi più elevati, quelli cioè che rappresentano le aree a maggiore rischio, sono accorpati in classi più ristrette, mentre per i ranghi con valori minori si scelgono classi più ampie.

#### 4.1 Esempio di modellizzazione di relazioni spaziali

Un esempio di un output del processo di modellazione è riportato nella Figura 6, che contiene parte del rapporto della modellazione eseguita con il software STM [Fabbri et al., 2017b], dove sono state utilizzate come DSP le forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel (11 frane rappresentate da 807 delle 1.204.404 celle dell'area di studio). Nella parte superiore della figura, la prima colonna (*theme*) contiene l'identificativo numerico della classe di uso del suolo in sequenza crescente da 4 a 14 (rinumerata in colonna 6 da 1 a 11); la seconda colonna (*freq-occur*) indica la frequenza normalizzata della sub-area dove sono presenti le occorrenze; mentre la terza colonna (*freq-non-occur*) contiene le corrispondenti frequenze della sub-area dove le occorrenze



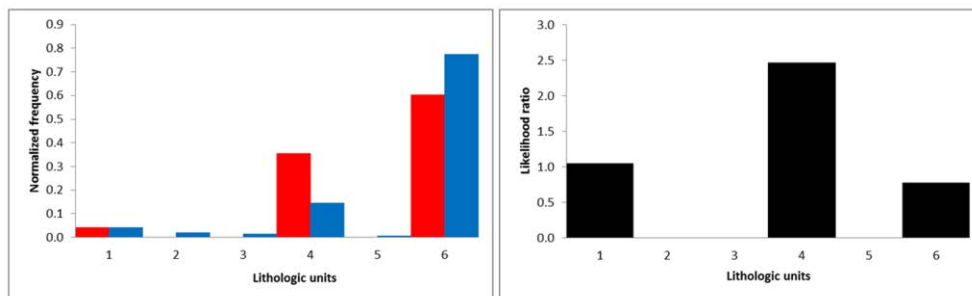
sono o assenti o non note. Infine, la quarta colonna (*ratio*) contiene i corrispondenti rapporti di verosimiglianza, cioè i rapporti tra i valori della colonna 2 e quelli della colonna 3. La quinta colonna rinumerera le 11 classi di uso dei suoli da 1 a 11. La parte inferiore della figura mostra i valori per le sei unità litologiche presenti nel pattern di supporto indiretto Litologia. Nel riquadro a sinistra sono elencati i valori di ELR di supporto alla modellizzazione più significativi, secondo la proposizione del punto 4. Le classi Insegiamento produttivo e Scorie/lapilli sono quelle con valori di ELR più alti, così come lo sono le quote intorno ai 540 m con pendenze elevate.



**Figura 6** Estratto dell’output dell’analisi eseguita con il software STM per l’area di studio del Lago Albano utilizzando le occorrenze di forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell’uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia, **U** e **L**, sia per esposizione dei versanti, DTM e pendenza, **a**, **d**, **s**. Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

**Figure 6** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The location of the 14 linear sub-aerial landslides is used to generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas using the presence of the eleven land-use classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either soil use and lithology, **U**, **L**, or aspect, DTM, and slope, **a**, **d**, **s**. See Figures 7-9 for interpreting the values.

La Figura 7 mostra gli istogrammi per le sei unità litologiche. A sinistra abbiamo le frequenze normalizzate, mentre a destra abbiamo il rapporto di verosimiglianza.



**Figura 7** Frequenze normalizzate (sinistra) e rapporti empirici di verosimiglianza (destra) per le sei litologie nell’area di studio del Lago Albano usando le occorrenze di forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel.

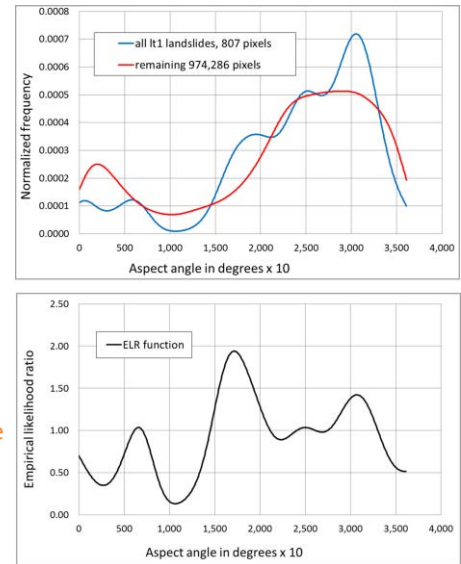
**Figure 7** Normalized frequencies (left) and empirical likelihood ratios (right) for the six lithology units of the study area of the Lake Albano. They were obtained using the occurrences of Debris flow channels, LT1.

Nelle Figure 8 e 9 abbiamo invece alcuni esempi di funzioni di densità (frequenze normalizzate) per le mappe digitali di supporto contenenti valori continui: Esposizione dei versanti in valori angolari nella Figura 8 e Quota in metri e Pendenza in valori angolari nella Figura 9. Sono considerati come discriminanti, secondo l'equazione del punto 4, i valori di ELR uguali o maggiori di 2.

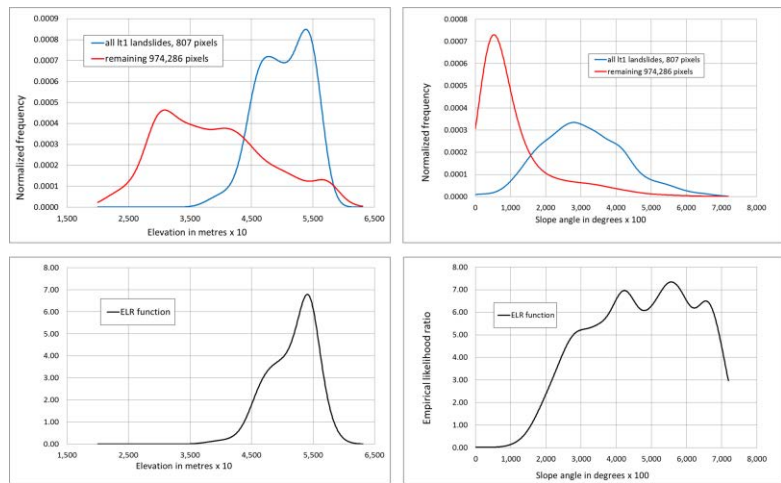
**Figura 8** Frequenze normalizzate delle funzioni di densità e rispettivi valori di rapporto di verosimiglianza per le mappe digitali di supporto dell'esposizione dei versanti usando le 11 occorrenze di forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel. È da notare la scarsa discriminazione tra sub-area con occorrenze e sub-area senza occorrenze con valori di ELR minori di 2 per gli angoli attorno a 175 gradi.

**Figure 8** Density functions (above) and their respective empirical likelihood ratios (below) for the map of aspect angles using the 11 occurrences of Debris flow channel. Note the poor discrimination between occurrence areas and non-occurrence areas, with ELR values below 2 for angles in the vicinity of 175 degrees.

Debole discriminazione



Buona discriminazione  $\geq 2$



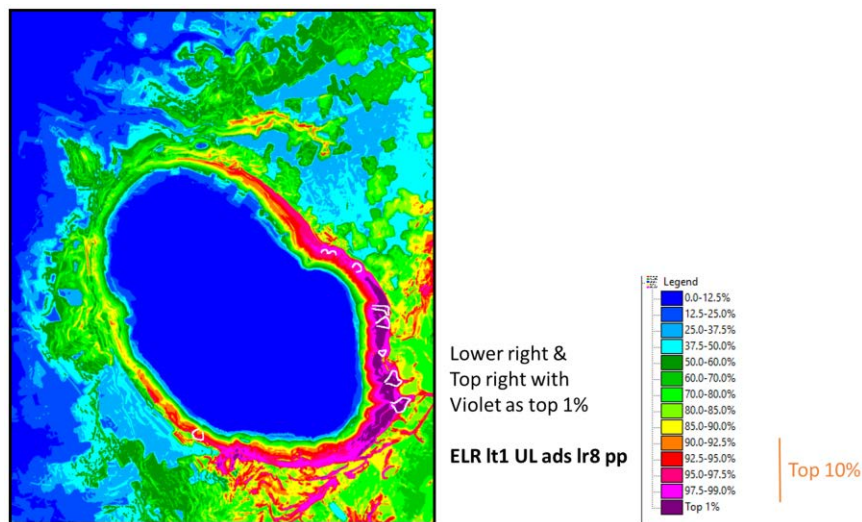
**Figura 9** Funzioni di densità (sopra) e rispettivi valori di rapporto di verosimiglianza (sotto) per le mappe con la quota in metri e la pendenza in valori angolari usando le 11 occorrenze di forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel. È da notare la buona discriminazione tra l'area con occorrenze e quella senza occorrenze per le quote tra i 450 e i 600 m e per le pendenze maggiori di 20 gradi.

**Figure 9** Density functions (above) and their respective likelihood ratios (below) for the maps of elevation in meters (left) and that of slope angles (right), using the 11 occurrences of Debris flow channel. Note the good discrimination between the occurrence area and the non-occurrence area for elevations interval 450-600 m and slope angles greater than 20 degrees.

Possiamo concludere che l'uso dei valori ELR, il rapporto empirico di verosimiglianza, serve a stabilire le relazioni spaziali tra il DSP e gli ISP, come evidenziato dagli esempi delle figure da 6 a 9. Le occorrenze vengono trattate come oggetti continui rappresentati da insiemi di celle adiacenti,

ciascuno con un identificativo univoco. Per esempio, 11 frane avranno identificativi da 1 a 11, in modo tale che tutti i valori statistici siano riferiti a una specifica occorrenza. L'insieme delle celle delle 11 frane rappresenta la sub-area con occorrenze. Il resto delle celle dell'area di studio rappresenta la sub-area dove non sono presenti o non è nota la presenza di frane.

Nella Figura 10 è riportato un esempio di pattern di predizione delle forme lineari subaeree *Debris flow channel*, indicate da linee bianche. La stessa analisi è stata eseguita per ciascuna forma subaerea e subacquea dell'area di studio e le relative mappe con i pattern di predizione sono riportate nel capitolo 5.



**Figura 10** Esempio di pattern di predizione del modello ELR per le 11 occorrenze di forme lineari subaeree LT1 - Debris flow channel utilizzate come DSP, rappresentate da linee bianche, e le mappe o pattern di supporto Litologia, Uso del suolo, DTM, Esposizione dei versanti, Pendenza, utilizzati come ISP.

**Figure 10** Example of prediction pattern using the ELR model for the 11 occurrences of Debris flow channel used as DSP. They are displayed as white lines overlying the colored ranks. The support of ISPs is for Lithology, Landuse, DTM, Aspect, and Slope.

## 4.2 Strategia di analisi predittiva

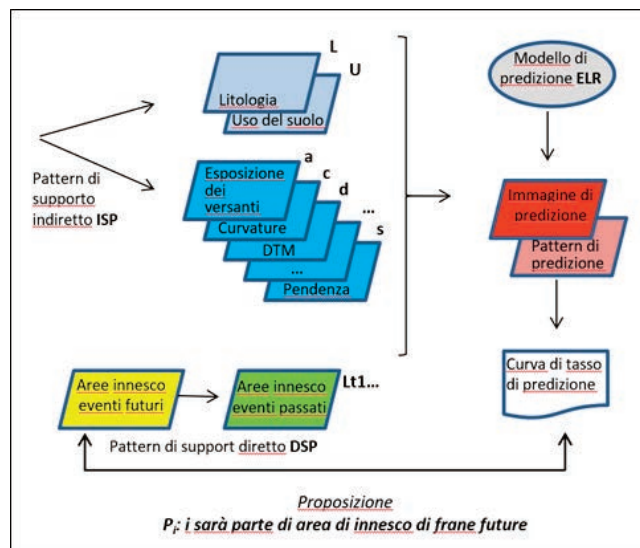
Ora che abbiamo prodotto un primo esempio di pattern di predizione ELR come mostrato nella Figura 10, possiamo considerare un flusso di modellizzazione più generalizzato come quello della Figura 11. In questo caso, la proposizione menzionata nel passo 4 del capitolo 4 viene riscritta:

$P_i$ : *i* sarà parte di una area di innesco di frane future (1)

che connette gli ISP e il DSP con la funzione modellizzante ELR per generare (integrare) una immagine di predizione (con valori da 0 a  $\infty$ ), poi convertiti in ranghi di eguale area che rappresentano il pattern di predizione. La sua qualità predittiva sarà in seguito misurata, tramite validazione incrociata, ed espressa come curva di tasso di predizione. È da notare la separazione del DSP in due parti, frane passate e frane future (cioè di stima e di validazione, rispettivamente), necessaria per la validazione incrociata.

**Figura 11** La modellizzazione spaziale predittiva è organizzata in pattern di supporto diretto DSP (es. LT1), patterns di support indiretto ISP (LUadscpf) e la proposizione che connette la funzione empirica di rapporto di verosimiglianza ELR, l'immagine di predizione modellizzata, il pattern di predizione e la curva di tasso di predizione (modificata da Fabbri e Chung, [2018]).

**Figure 11** Spatial prediction modelling is organized into direct supporting pattern, DSP (e.g., LT1), indirect supporting patterns ISPs (LUadscpf) and the proposition linking empirical likelihood function, ELR, modelled prediction image, prediction pattern and prediction-rate curve (modified after Fabbri and Chung, [2018]).

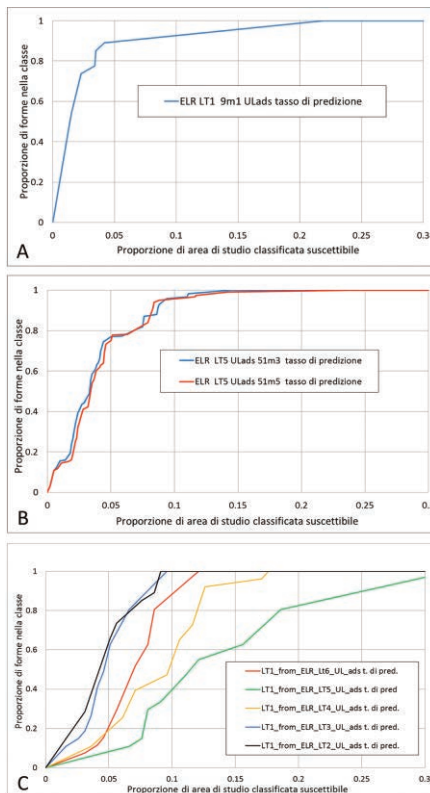


### 4.3 Validazione incrociata

La procedura di validazione incrociata suggerita da Chung e Fabbri [2003] è stata utilizzata per generare le curve del tasso di predizione prodotte dalla funzione di ELR. Per valutare la qualità dei pattern di predizione come *predittori* di frane future si assume di non conoscere l'esistenza di alcune delle frane presenti nel database. Le restanti sono utilizzate per generare nuovi pattern di predizione e quelle che sono state escluse sono usate come validazione incrociata (*cross-validation*) per vedere quanto correttamente sono state predette (cioè il rango di predizione corrispondente alla loro posizione spaziale). Quando il numero di occorrenze è basso si esclude una delle frane in modo sequenziale. Quando è invece elevato, ne vengono escluse casualmente più di una contemporaneamente. Questa procedura iterativa permette di valutare quanto correttamente l'algoritmo ha predetto le frane escluse, fornendo un indice di validazione della predizione.

Le frane cartografate sono state quindi divise in due gruppi: il gruppo Stima di n-m elementi e il gruppo Validazione di m elementi. È stata generata una mappa della previsione del rischio utilizzando solo n-m frane del gruppo Stima, confrontati poi con la mappa digitale contenente le m frane del gruppo Validazione.

Alcuni esempi di curve di tasso di predizione sono mostrate nella Figura 12. Nei diagrammi sull'asse orizzontale si mostra l'area cumulativa o proporzione di classi in ordine decrescente e sull'asse verticale le proporzioni di forme nelle classi corrispondenti. Nella Figura 12A è mostrata la curva dalla validazione iterativa di esclusione di una forma LT1 su 9. La curva dà una idea della qualità del pattern corrispondente come predittore della *prossima* forma: il 2,5% delle classi più elevate contiene il 74% delle forme, il 5% ne contiene il 90%, il 10% il 92% e il 15% il 96%. Nella Figura 12B abbiamo le curve di esclusione di 3 e 5 forme LT5 su 51. Osserviamo che il 5% delle classi più elevate contiene circa il 78% delle forme, il 10% ne contiene il 97% e il 15% ne contiene il 99%. Le due curve sono pressoché coincidenti. Nella Figura 12C, invece, le curve mostrano i tassi di predizione delle forme LT1 usando i pattern di predizione per LT2-LT6. Osserviamo che le curve dei pattern di LT2 e LT3 contengono entrambe oltre il 60% delle forme LT1, mentre i pattern di LT6 ed LT4 circa il 18% e infine il pattern di LT5 solo l'8%. In tutti questi casi si usano come ISP **ULads**. Vedi i pattern corrispondenti nelle Figure 18, 19, 21, 23, 25 e 27.



**Figura 12** Curve di tasso di predizione da ELR. In (A) per le 9 forme **LT1** (807 pixel) usando la validazione incrociata iterativa con esclusione di una forma. In (B) per le 51 forme **LT5** (2969 pixel) con esclusione di 3 e di 5 forme. In (C) usando i pattern di predizione di **LT2-LT6** per convalidare le 9 forme **LT1**. Si mostra solo il 30% dei ranghi più elevati. In tutti i casi gli ISP sono **ULads**.

*Figure 12* ELR prediction-rate curves. In (A) for the 9 **LT1** landslides (807 pixels) using iterative cross-validation with exclusion of one. In (B) for the 51 **LT5** landslides (2969 pixels) with exclusion of 3 and 5. In (C) using the prediction patterns for **LT2-LT6** to cross-validate the 9 **LT1** landslides. Only the top 30% ranks are shown. All the curves use **ULads** as ISPs.

## 5. Risultati

### 5.1 Risultati dell'analisi di regressione

I valori dell'analisi di regressione indicano inequivocabilmente che il modello proposto è affetto da errore. Il valore  $p$  di Jarque-Bera indica che è presente una correlazione spaziale dei residui (Figura 3), errore che potrebbe essere dovuto a delle specifiche errate, come per esempio la mancanza di una o più variabili indipendenti chiave, la cui assenza impedisce di spiegare completamente il fenomeno che si sta indagando. Tra queste potrebbero quasi sicuramente migliorare il modello sia la permeabilità delle varie litologie, sia le informazioni idrogeologiche sulla falda, **che non sono state rinvenute in letteratura alla scala idonea per l'analisi**. Anche una cartografia più di dettaglio rispetto a quella reperita in letteratura e utilizzata nel presente lavoro potrebbe aiutare a migliorare i risultati dell'analisi di regressione.

### 5.2 Risultati dell'analisi del Rapporto empirico di verosimiglianza ELR

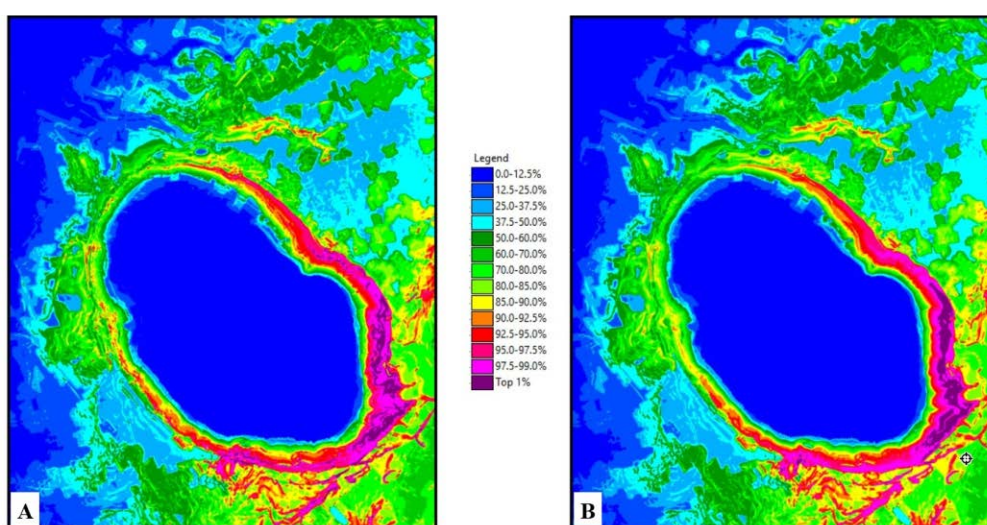
Nella nostra ricerca abbiamo utilizzato il rapporto di verosimiglianza empirico ELR come metodo per rappresentare le relazioni spaziali. Inoltre, abbiamo usato la sua funzione per integrare tali relazioni per generare i pattern di predizione di suscettibilità e sono state accettate una serie di ipotesi per applicare la funzione e interpretare i risultati. Abbiamo utilizzato alcune suddivisioni di buon senso e visualizzazioni di pattern insieme a curve cumulative per descrivere la qualità dei modelli. Nelle seguenti sottosezioni consideriamo i primi pattern di previsione dei canali di flusso dei detriti, un tipo di forma sub-aerea lineare **LT1**. Quindi osserviamo una varietà di supporti



numerici per modelli di previsione di altre forme lineari **LT2-LT6** e confrontiamo le loro qualità predittive utilizzando tutti gli ISP **LUadscpf** o solo **LUads**. Il contributo di **cpf** appare invece marginale. Successivamente, consideriamo le forme subacquee lineari **LA1-LA4**. In questo caso utilizziamo solo gli ISP derivati dal modello digitale del terreno **ads** e **adscpf**. Consideriamo poi le forme subaeree poligonali **PT1-PT5** utilizzando gli interi poligoni come aree di innesco e come ISP **LUadscpf** e **LUads** per il confronto. Infine, consideriamo solo le forme subacquee poligonali con **adscpf** e **ads**. Molte altre fasi di elaborazione e analisi potrebbero essere intraprese per analizzare ulteriormente questi modelli iniziali del nostro studio pilota. **Tuttavia, un supporto migliore potrebbe essere fornito utilizzando mappe litologiche e del suolo più dettagliate e raffinate, o cartografie aggiuntive come la permeabilità del suolo e delle rocce e dati sulle falde acquifere presenti nell'area del Lago Albano.** Sono stati prodotti vari gruppi di pattern di previsione per le diverse forme usate come supporto diretto (DSP). Lo scopo è l'interpretazione visiva dei pattern ottenuti usando varie combinazioni di supporto indiretto (ISP), ma anche quella dei livelli di supporto da singoli ISP. Inizialmente si è cercato di identificare gli ISP di maggiore supporto alla modellizzazione, cioè alla proposizione (1), poi per le forme lineari subaeree **LT1** - Debris flow channels, la visualizzazione e quindi il supporto numerico. In seguito, sono stati visualizzati i pattern di previsione per tutte le forme lineari subaeree **LT1-LT6** e subacquee **LA1-LA4**, poligonali subaeree **PT1-PT5** e subacquee **PA1-PA4**.

### 5.2.1 Analisi del supporto alla modellizzazione degli ISP

Prima di eseguire l'analisi di integrazione dei rapporti empirici di verosimiglianza ELR, è stato effettuato un ulteriore test con i pattern di previsione per confermare gli ISP più importanti per la modellazione, individuati dall'analisi delle variabili indipendenti con lo strumento Exploratory Regression (ER). Il test, effettuato sulle Forme lineari subaeree, ha confermato l'importanza di Litologia **L**, Uso del suolo **U**, DTM **d**, Esposizione dei versanti **a** e Pendenza **s**, mentre ha mostrato chiaramente che **c**, **p**, **f** sono poco influenti sulla modellizzazione dato che i rispettivi pattern di previsione sono estremamente simili tra di loro (Figura 13).



**Figura 13** Pattern di previsione ELR per la forma di frana subaerea **LT1** - Debris flow channel, usando come ISP: Litologia, Uso del suolo, DTM, Esposizione dei versanti, Pendenza, Curvatura, Profilo, Planform (**LUadscpf**) in (A) e usando **solo** Litologia, Uso del suolo, DTM, Esposizione dei versanti, Pendenza (**LUads**) in (B).  
**Figure 13** Prediction patterns of Debris flow channel landslide occurrence, **LT1**, using as ISPs: Landuse, DTM, aspect, slope, curvature, profile and planform (**LUadscpf**) in (A) or **only** Lithology, landuse, aspect and slope, (**LUads**) in (B).

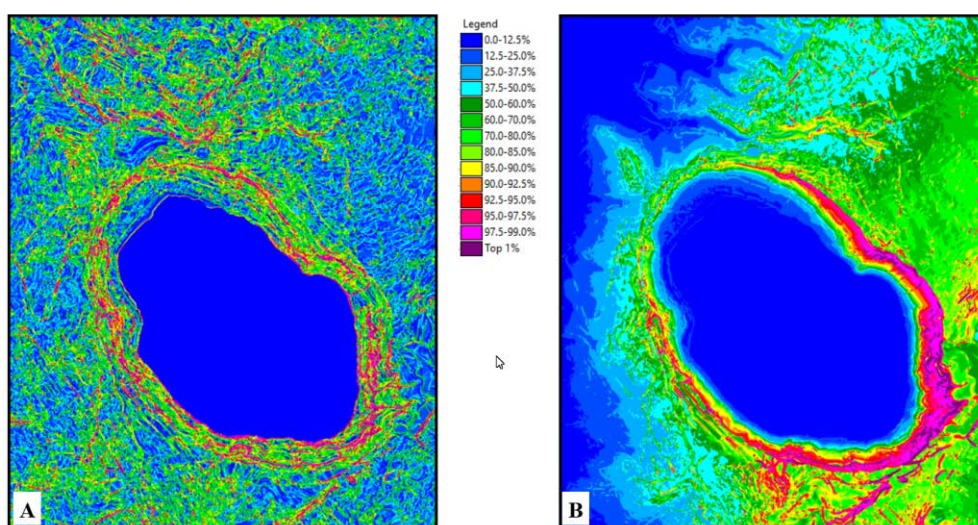
Il medesimo test è stato effettuato anche per le Forme di frana lineari subacquee e le Forme di frana poligonali subacquee, ottenendo risultati analoghi. In particolare, nel test per i pattern di predizione ELR per le Forme di frana lineari subacquee, **c**, **p**, **f** sono risultati di scarsa importanza in particolare per le forme **LA1** - Flow channel e leggermente più di aiuto per le forme **LA2** - Landslide scarp e **LA4** - Supposed tension crack. Anche in questo caso, in generale, i pattern di predizione con e senza **c**, **p**, **f** sembrano essere praticamente identici. Questo risultato potrebbe essere dovuto alla dipendenza condizionale con il DTM dal quale le tre mappe digitali derivano e che, come già dimostrato nell'analisi esplorativa di regressione ER, causa una ridondanza di informazioni.

Si è pertanto deciso di utilizzare per l'analisi del Rapporto empirico di verosimiglianza ELR solo gli ISP Litologia **L**, Uso del suolo **U**, per le sole forme subaeree sia lineari sia poligonali e gli ISP, DTM **d**, Esposizione dei versanti **a** e Pendenza **s** per tutti i tipi di forme di frana cartografati.

Anche nell'analisi ELR vale la precisazione che, in funzione dei dati acquisiti in letteratura per le forme poligonali subacquee [Mazzanti et al., 2007] che cartografano gli accumuli di frana subacquee, i pattern di predizione saranno pertanto relativi alle condizioni di accumulo.

### 5.2.2 Visualizzazione di pattern di predizione per LT1 - Debris flow channel

Nelle Figure 14-17 sono mostrati i pattern di predizione dell'Empirical Likelihood Ratio per gli Indirect Supporting Pattern (ISP) Litologia **L**, Uso del suolo **U**, Esposizione dei versanti **a**, DTM **d** e Pendenza **s** e degli ISP derivati dal DTM Curvatura **c**, Profilo **p**, Planform **f** per la sola Forma di frana lineare subaerea **LT1** - Debris flow channel. I pattern nelle illustrazioni sono ottenuti usando diversi raggruppamenti di ISP al fine di apprezzarne gli effetti spaziali separatamente per **cpf**, **adscpf**, **ads**, **LUcpf**, **LUadscpf**, **LU** e **LUads**.

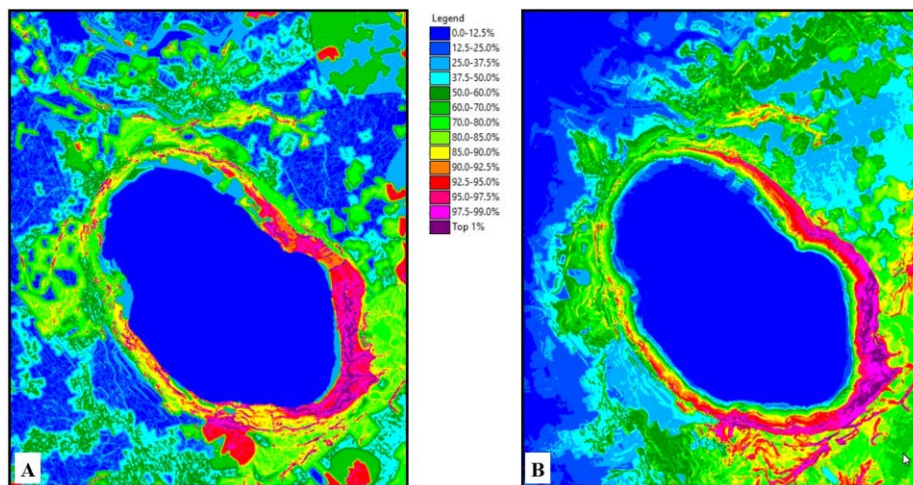
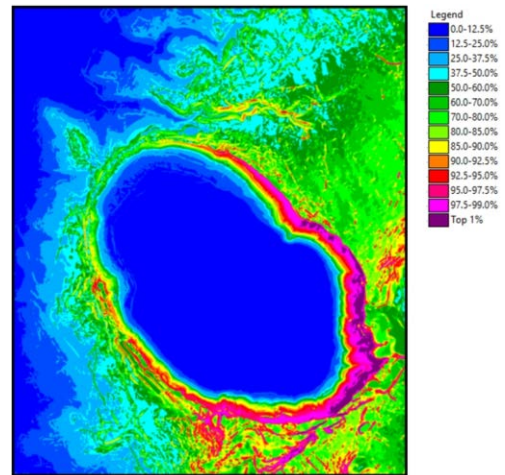


**Figura 14** Pattern di predizione ELR per **LT1** con ISP: Curvatura, Profilo, Planform (**cpf**) in (A) e con Curvatura, Profilo, Planform, DTM, Esposizione dei versanti, Pendenza (**dascpf**) in (B).

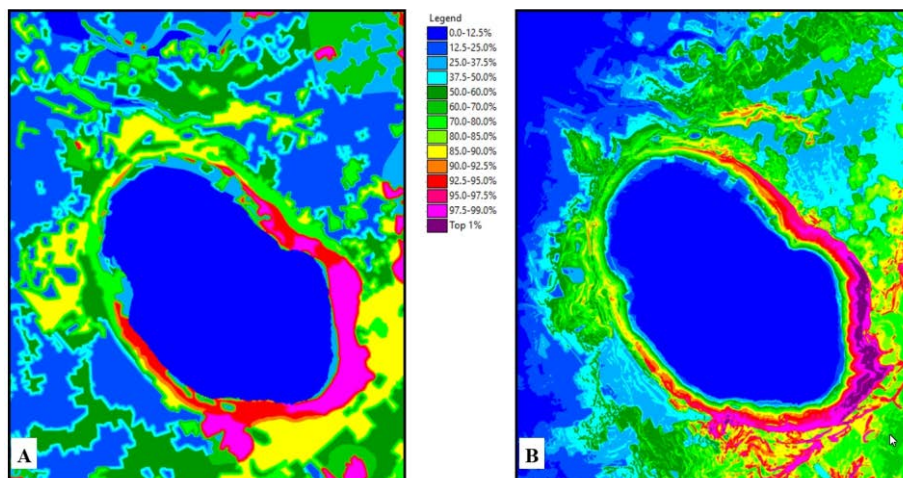
**Figure 14** ELR prediction pattern for **LT1** using ISPs: Curvature, Profile, Planform (**cpf**), in (A), and Curvature, Profile, Planform, DTM, Aspect, Slope (**dascpf**) in (B).



**Figura 15** Pattern di predizione ELR per **LT1** con ISP: Esposizione dei versanti, DTM, Pendenza (ads).  
**Figure 15** ELR prediction pattern of **LT1** using ISPs: DTM, Aspect, Slope (ads).



**Figura 16** Pattern di predizione ELR per **LT1** con ISP: Litologia, Uso del suolo, Curvatura, Profilo, Planform (**LUcpcf**) in (A) e Litologia, Uso del suolo, Curvatura, Profilo, Planform, DTM, Esposizione dei versanti, Pendenza (**LUadscpf**) in (B).  
**Figure 16** ELR prediction pattern of **LT1** using ISP: Lithology, Landuse, Curvature, Profile, Planform (**LUcpcf**) in (A), and Lithology, Landuse, Curvature, Profile, Planform, DTM, Aspect, Slope (**LUadscpf**) in (B).

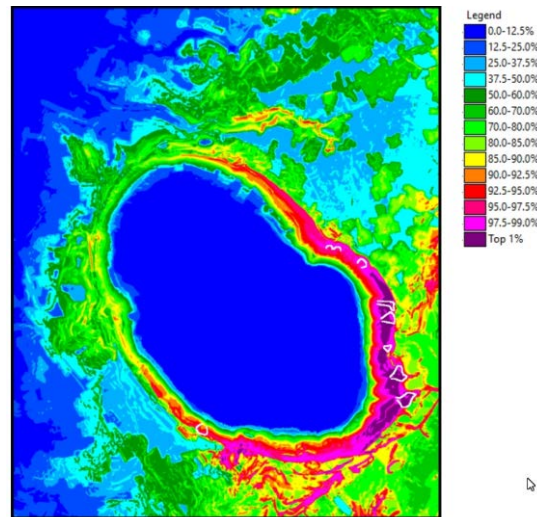


**Figura 17** Pattern di predizione ELR per **LT1** con ISP: Litologia, Uso del suolo (**LU**) in (A) e Litologia, Uso del suolo, Esposizione dei versanti, DTM, Pendenza (**LUads**) in (B).  
**Figure 17** ELR prediction pattern of **LT1** Using ISPs: Lithology, Landuse (**LU**) in (A), and Lithology, Landuse, Aspect, DTM, Slope (**LUads**) in (B).



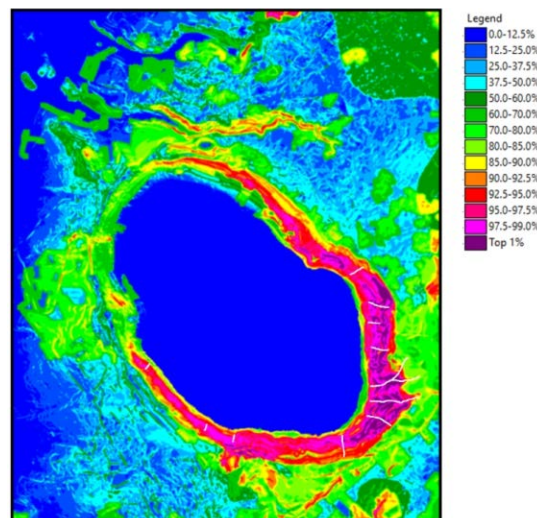
### 5.2.3 Supporto numerico al pattern di predizione di Forme lineari subaeree LT1-LT6

Consideriamo ancora il pattern di predizione ELR per le Forme di frana lineari subaeree **LT1-LT6** usando gli ISP: Litologia **L**, Uso del suolo **U**, Esposizione dei versanti **a**, DTM **d**, Pendenza **s**. Essi sono rappresentati nelle Figure 18-28, ciascun pattern seguito dal rispettivo output di valori ELR.



**Figura 18** Pattern di predizione ELR di **LT1** - Debris flow channel, con ISP **LUads**. Le forme di frana **LT1** sono sovrapposte come linee bianche. I valori ELR degli ISP corrispondenti sono mostrati in Figura 6.

*Figure 18* ELR prediction pattern of **LT1** using ISPs **LUads**. Landslide forms are overlaid as white lines. Corresponding ELR values are in Figure 6.

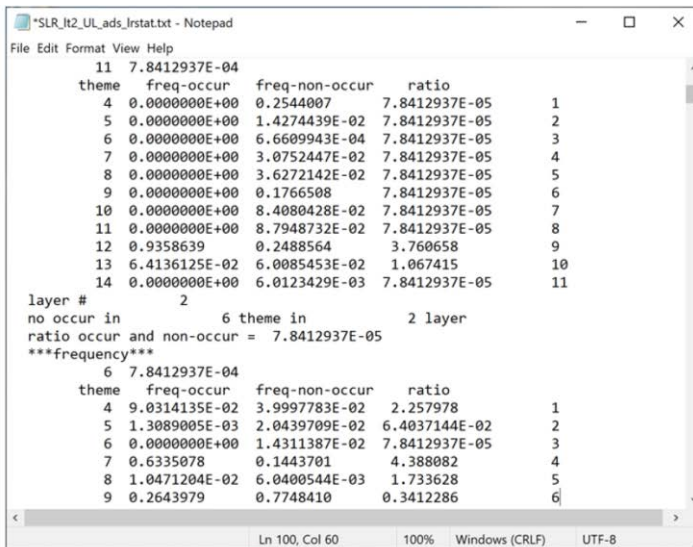


**Figura 19** Pattern di predizione ELR di **LT2** - Debris Flow Scar con ISP **LUads**. Le forme di frana **LT2** sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 19* ELR prediction pattern of **LT2** using ISPs **LUads**. Landslide forms are overlaid as white lines.

**ELR values**

$U_9=3.76$ ;  $U_{10}=1.07$   
 $L_1=2.26$ ;  $L_4=2.44$ ;  $L_5=1.73$ ;  
 $L_6=0.34$   
**a** (max 1.55 at 206d)  
**d**  $\geq 2$  479-496 (max **2.03** at 487m); 528-569 (max **2.65** at 551m)  
**s**  $\geq 22$  22-70 (max **12.92** at 57d)  
**U<sub>9</sub>** Insediamento produttivo  
**L<sub>1</sub>** Breccia  
**L<sub>4</sub>** Scorie/lapilli  
**L<sub>5</sub>** Lava (leucitite/trachyte)

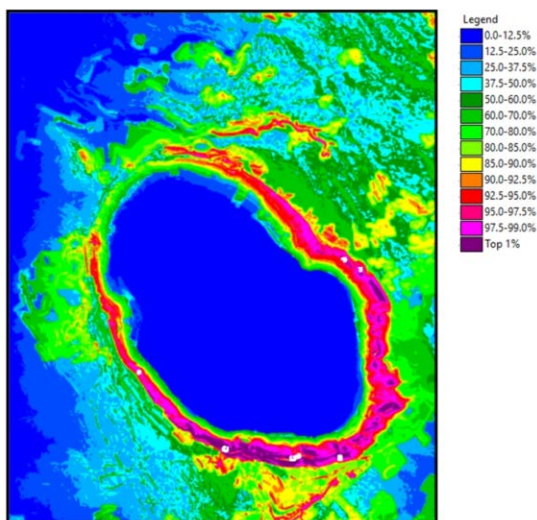


Uso del suolo

Litologia

**Figura 20** Estratto dell'output dell'analisi eseguita con il software STM per l'area di studio del Lago Albano utilizzando le 10 occorrenze di forme lineari subaeree LT2 - Debris flow scar. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell'uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia (**U** e **L**), sia per Esposizione dei versanti, DTM e Pendenza (**a**, **d**, **s**). Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

**Figure 20** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The location of eleven linear sub-aerial landslides is used for generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas using the presence of the eleven **land use** classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either land use and lithology, **U**, **L**, or aspect, DTM, and slope, **a**, **d**, **s**. See Figures 7-9 for interpreting the values.



**Figura 21** Pattern di predizione ELR di LT3 - Drainage line con IDP LUads. Le forme di frana LT3 sono sovrapposte come linee bianche.

**Figure 21** ELR prediction pattern of LT3, Drainage line, using ISPs LUads. Landslide forms are overlaid as white lines.

**ELR values**

**U<sub>9</sub>=3.22; U<sub>10</sub>=3.29**

L<sub>1</sub>=1.41; L<sub>4</sub>=1.64; L<sub>6</sub>=0.91

**a** ≥ 2 0-83 (max **3.76** at 14d);  
353-361 (max **2.30** at 361d)

**d** ≥ 2 430-519 (max **4.54** at 469m)

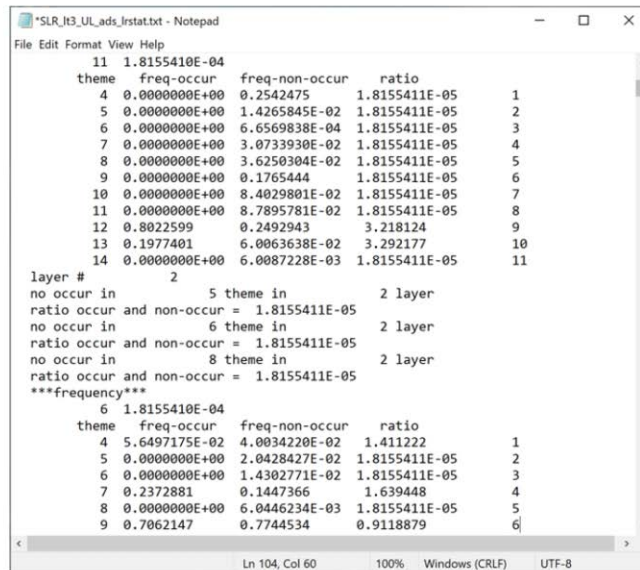
**s** ≥ 2 22-73 (max **82.39** at 73d)

**U<sub>9</sub>** Insediamento produttivo

**U<sub>10</sub>** Copertura vegetale

arbustiva e.o erbacea

L<sub>4</sub> Lava (leucite/trachyte)

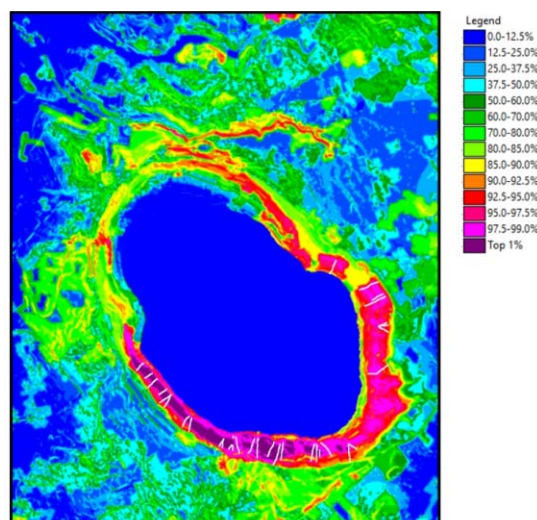


Uso del suolo

Litologia

**Figura 22** Estratto dell'output dell'analisi eseguita con il software STM per l'area di studio del Lago Albano utilizzando le occorrenze di forme lineari subaeree LT3 - Drainage line. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell'uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia (U e L), sia per esposizione dei versanti, DTM e pendenza (a, d, s). Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

**Figure 22** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The locations have been used of linear sub-aerial landslides Drainage line LT3, for generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas using the presence of the eleven land use classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either soil use and lithology, U, L, or aspect, DTM, and slope, a, d, s. See Figures 7-9 for interpreting the values.



**Figura 23** Pattern di predizione ELR di LT4 - Rockfall Topple Scarp con IDP LUads. Le forme di frana LT4 sono sovrapposte come linee bianche.

**Figure 23** ELR prediction pattern of LT4, Rockfall Topple Scarp, using ISPs LUads. Landslide forms LT4 are overlaid as white lines.

**ELR values**

**U<sub>9</sub>=4.01;**  
**L<sub>1</sub>=10.72;** L<sub>2</sub>= 0.18; L<sub>4</sub>=**2.60;**  
L<sub>5</sub>=**2.84;** L<sub>6</sub>=0.23;

**a** ≥2 0-75 (max **3.89** at 16d)

**d** ≥1 334-503 (max 1.95 at 449m)

**s** ≥2 23-72 (max **11.50** at 46d)

**U<sub>9</sub>** Insediamento produttivo  
**L<sub>1</sub>** Breccia  
**L<sub>4</sub>** Scorie/lapilli  
**L<sub>5</sub>** Lava (leucite/trachyte)

| theme | freq-occur    | freq-non-occur | ratio         |    |
|-------|---------------|----------------|---------------|----|
| 11    | 1.3802325E-03 |                |               |    |
| 4     | 2.2321430E-03 | 0.2545492      | 8.7690046E-03 | 1  |
| 5     | 0.0000000E+00 | 1.4282942E-02  | 1.3802326E-04 | 2  |
| 6     | 0.0000000E+00 | 6.6649617E-04  | 1.3802326E-04 | 3  |
| 7     | 0.0000000E+00 | 3.0770764E-02  | 1.3802326E-04 | 4  |
| 8     | 0.0000000E+00 | 3.6293749E-02  | 1.3802326E-04 | 5  |
| 9     | 0.0000000E+00 | 0.1767560      | 1.3802326E-04 | 6  |
| 10    | 0.0000000E+00 | 8.4130511E-02  | 1.3802326E-04 | 7  |
| 11    | 0.0000000E+00 | 8.8001117E-02  | 1.3802326E-04 | 8  |
| 12    | 0.9970238     | 0.2483628      | 4.014385      | 9  |
| 13    | 7.4404763E-04 | 6.0170535E-02  | 1.2365647E-02 | 10 |
| 14    | 0.0000000E+00 | 6.0159238E-03  | 1.3802326E-04 | 11 |

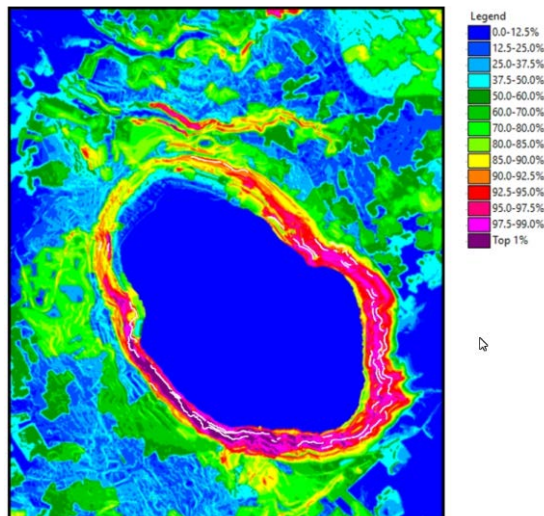
| theme | freq-occur    | freq-non-occur | ratio         |   |
|-------|---------------|----------------|---------------|---|
| 6     | 1.3802325E-03 |                |               |   |
| 4     | 0.4233631     | 3.9508127E-02  | 10.71585      | 1 |
| 5     | 3.7202381E-03 | 2.0447774E-02  | 0.1819385     | 2 |
| 6     | 0.0000000E+00 | 1.4319912E-02  | 1.3802326E-04 | 3 |
| 7     | 0.3757440     | 0.1444346      | 2.601483      | 4 |
| 8     | 1.7113095E-02 | 6.0282475E-03  | 2.838818      | 5 |
| 9     | 0.1800595     | 0.7752614      | 0.2322565     | 6 |

Uso del suolo

Litologia

**Figura 24** Estratto dell'output dell'analisi eseguita con il software STM per l'area di studio del Lago Albano utilizzando le occorrenze di forme lineari subaeree LT4 Rockfall Topple Scarp. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell'uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia (**U** e **L**), sia per esposizione dei versanti, DTM e pendenza (**a**, **d**, **s**). Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

**Figure 24** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The locations have been used of linear sub-aerial landslides LT4, Rockfall Topple Scarp, for generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas using the presence of the eleven land use classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either land use and lithology, **U**, **L**, or aspect, DTM, and slope, **a**, **d**, **s**. See Figures 7-9 for interpreting the values.



**Figura 25** Pattern di predizione ELR di LT5 - Complex Landslide Scar con IDP LUads. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

**Figure 25** ELR prediction pattern of LT5, Complex Landslide Scar, using ISPs LUads. Landslide forms are overlaid as white lines.



**ELR values**

$U_6=0.18$ ;  $U_9=3.44$ ;  $U_{10}=1.93$

$L_1=9.15$ ;  $L_2=0.35$ ;  $L_4=3.29$ ;

$L_5=6.40$ ;  $L_6=0.16$

$a \geq 25-84$  (max **2.88** at 53d)

$d \geq 1305-414$  (max 1.80 at 354m); 426-484 (max 1.52 at 459m)

$s \geq 25-75$  (max **67.90** at 72d)

$U_9$  Insediamento produttivo

$U_{10}$  Copertura vegetale

arbustiva e/o erbacea

$L_1$  Breccia

$L_4$  Scorie/lapilli

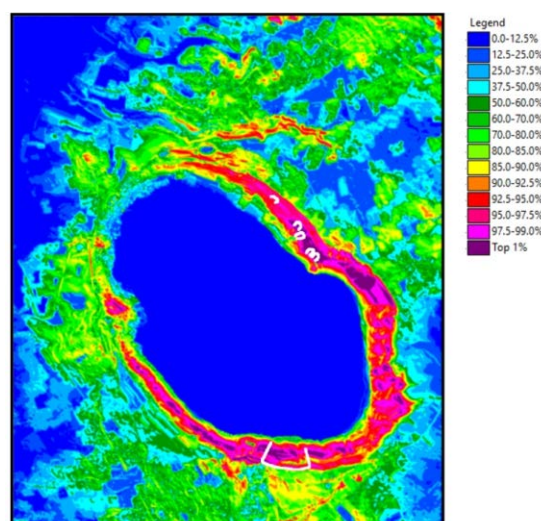
$L_5$  Lava (leucite/trachyte)

Usò del suolo

Litologia

**Figura 26** Estratto dell'output dell'analisi eseguita con il software STM per l'area di studio del Lago Albano utilizzando le occorrenze di forme lineari subaeree **LT5** - Complex Landslide Scar. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell'uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia (**U** e **L**), sia per esposizione dei versanti, DTM e pendenza (**a**, **d**, **s**). Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

**Figure 26** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The locations have been used of linear sub-aerial landslides **LT5**, Complex Landslide Scar, for generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas using the presence of the eleven land use classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either land use and lithology, **U**, **L**, or aspect, DTM, and slope, **a**, **d**, **s**. See Figures 7-9 for interpreting the values.



**Figura 27** Pattern di predizione ELR di **LT6** - Rockslide Scar con IDP **LUads**. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

**Figure 27** ELR prediction pattern of **LT6**, Rockslide Scar, using ISPs **LUads**. Landslide forms are overlaid as white lines.

### ELR values

$U_1=0.19$ ;  $U_9=2.09$ ;  $U_{10}=7.15$   
 $L_1=3.90$ ;  $L_4=3.36$ ;  $L_6=0.46$

$a \geq 2$  -45 (max **2.70** at 29d)

$d \geq 2$  386- 415 (max **2.21** at 400m); 479-524 (max **3.86** at 502m)

$s \geq 2$  22-66 (max **9.79** at 38d and max **4.69** at 60d)

$U_9$  Insediamento produttivo  
 $U_{10}$  Copertura vegetale arbustiva e / o erbacea  
 $L_1$  Breccia  
 $L_4$  Scorie / lapilli

| theme | freq-occur    | freq-non-occur | ratio         |    |
|-------|---------------|----------------|---------------|----|
| 11    | 5.1303470E-04 |                |               |    |
| 4     | 4.8000000E-02 | 0.2543072      | 0.1887481     | 1  |
| 5     | 0.0000000E+00 | 1.4270572E-02  | 5.1303472E-05 | 2  |
| 6     | 0.0000000E+00 | 6.6591898E-04  | 5.1303472E-05 | 3  |
| 7     | 0.0000000E+00 | 3.0744115E-02  | 5.1303472E-05 | 4  |
| 8     | 0.0000000E+00 | 3.6262318E-02  | 5.1303472E-05 | 5  |
| 9     | 2.0000001E-03 | 0.1766019      | 1.1324905E-02 | 6  |
| 10    | 0.0000000E+00 | 8.4057651E-02  | 5.1303472E-05 | 7  |
| 11    | 0.0000000E+00 | 8.7924905E-02  | 5.1303472E-05 | 8  |
| 12    | 0.5220000     | 0.2492548      | 2.094242      | 9  |
| 13    | 0.4280000     | 5.9899878E-02  | 7.145257      | 10 |
| 14    | 0.0000000E+00 | 6.0107140E-03  | 5.1303472E-05 | 11 |

| theme | freq-occur    | freq-non-occur | ratio         |   |
|-------|---------------|----------------|---------------|---|
| 6     | 5.1303470E-04 |                |               |   |
| 4     | 0.1560000     | 3.9977714E-02  | 3.902174      | 1 |
| 5     | 0.0000000E+00 | 2.0435197E-02  | 5.1303472E-05 | 2 |
| 6     | 0.0000000E+00 | 1.4307511E-02  | 5.1303472E-05 | 3 |
| 7     | 0.4860000     | 0.1445783      | 3.361500      | 4 |
| 8     | 0.0000000E+00 | 6.0466267E-03  | 5.1303472E-05 | 5 |
| 9     | 0.3580000     | 0.7746546      | 0.4621414     | 6 |

Use del suolo

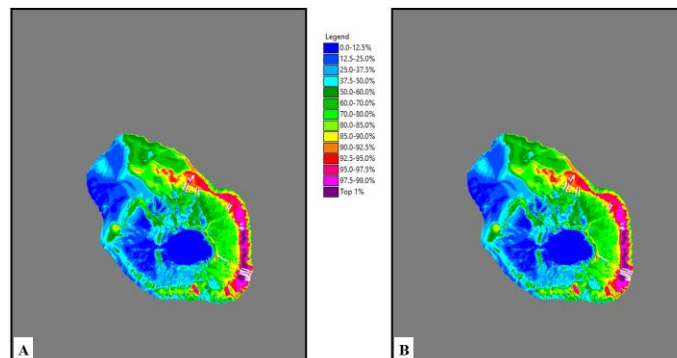
Litologia

**Figura 28** Estratto dell'output dell'analisi eseguita con il software STM per l'area di studio del Lago Albano utilizzando le occorrenze di forme lineari subaeree **LT6 - Rockslide Scar**. I valori mostrano le frequenze normalizzate per le 11 classi dell'uso del suolo e le 6 classi della litologia. I valori ELR principali di supporto sono elencati a sinistra, sia per uso del suolo e litologia (**U** e **L**), sia per esposizione dei versanti, DTM e pendenza (**a**, **d**, **s**). Vedi le Figure 7-9 per la spiegazione dei valori.

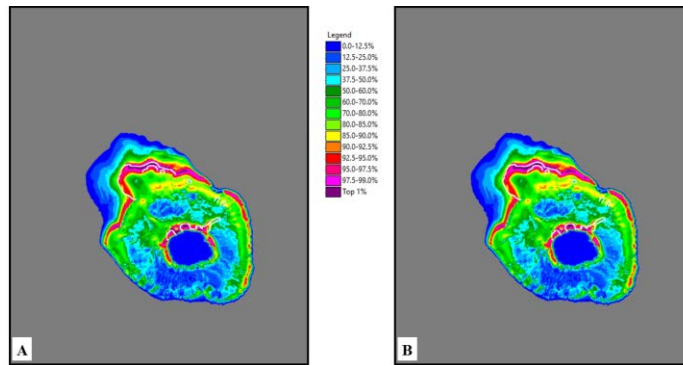
**Figure 28** Partial output of an analysis with STM software over the study area of Lake Albano. The locations of linear sub-aerial landslides, **LT6, Rockslide Scar**, were used for generating ELR values as ratios of normalized frequencies between occurrence and non-occurrence areas with the presence of the eleven land use classes and six lithological units. On the left are the supporting ELR values, for either land use and lithology, **U**, **L**, or aspect, DTM, and slope, **a**, **d**, **s**. See Figures 7-9 for interpreting the values.

## 5.2.4 Esperimenti per le Forme lineari subacquee LA1-LA4

Nelle Figure 29-32 sono mostrati i test per i pattern di predizione dell'Empirical Likelihood Ratio per gli Indirect Supporting Pattern (ISP) Esposizione dei versanti (**a**), DTM (**d**), Pendenza (**s**) e degli ISP derivati dal DTM Curvatura (**c**), Profilo (**p**), Planform (**f**) per le Forme di frana lineari subacquee **LA1-LA4**. A sinistra abbiamo i pattern generati usando i sei ISP **adscpf** e a destra quelli generati usando solo i tre ISP **ads**, al fine di mostrare l'impatto di **cpf**.

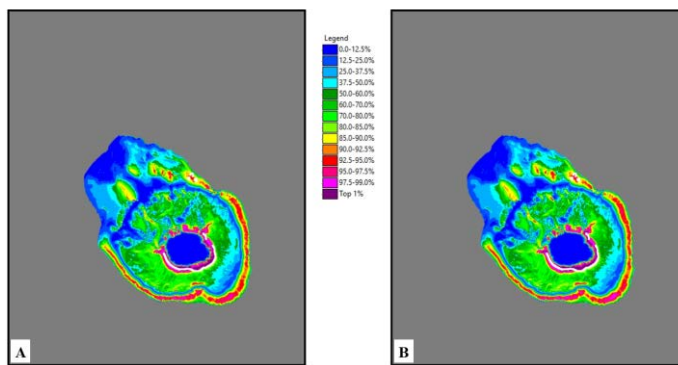


**Figura 29** Pattern di predizione ELR di **LA1 - Flow Channel** con IDP **adscpf** in (A) e **ads** in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.  
**Figure 29** ELR prediction pattern of **LA1, Fhannel**, using ISPs **adscpf**, in (A), and **ads** in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.



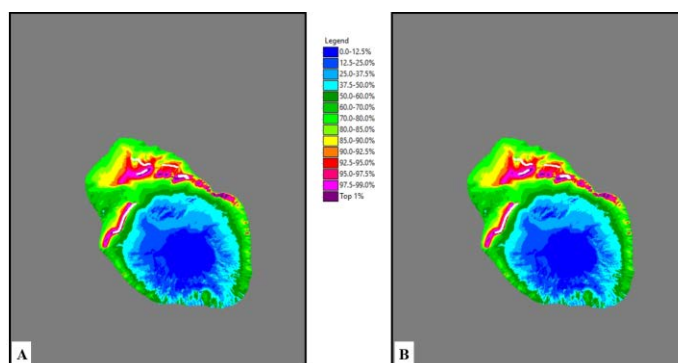
**Figura 30** Pattern di predizione ELR di LA2 - Landslide Scarp con ISP *adscpf* in (A) e con *ads* in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 30* ELR prediction pattern of LA2, Landslide Scarp, using ISPs *adscpf* in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.



**Figura 31** Pattern di predizione ELR di LA3 - Rockfall Topple Scarp con IDP *adscpf* in (A) e con *ads* in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 31* ELR prediction pattern of LA3, Rockfall Topple Scarp, using ISPs *adscpf* in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.



**Figura 32** Pattern di predizione ELR di LA4 - Supposed Tension Crack con ISP *adscpf* in (A) e con *ADS* in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

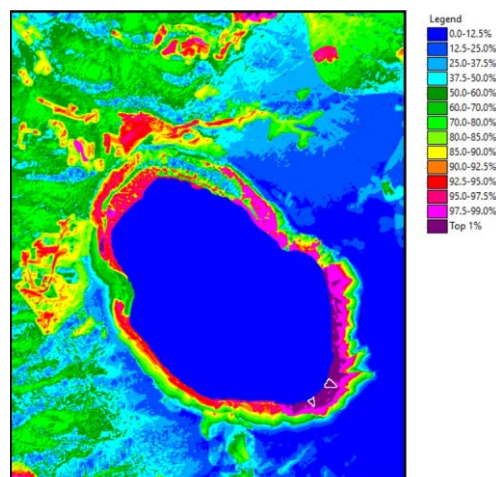
*Figure 32* ELR prediction pattern of LA4, Supposed Tension Crack, using ISPs *adscpf* in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.

## 5.2.5 Esperimenti per le Forme poligonali subaeree PT1-PT5

Nelle Figure 33-37 sono mostrati i risultati dei test per i Pattern di predizione dell'Empirical Likelihood Ratio per gli Indirect Supporting Pattern (ISP), Litologia (L), Uso del suolo (U), Esposizione dei versanti (a), DTM (d), Pendenza (s) per le Forme di frana poligonali subaeree PT1-PT5.

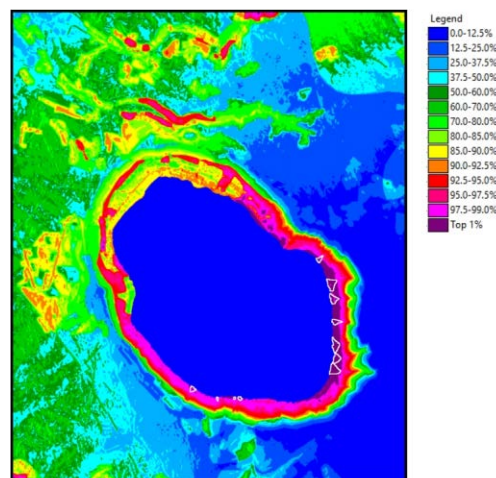
**Figura 33** Pattern di predizione ELR di PT1 - Alluvial Fan con ISP LUads. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 33 ELR prediction pattern of PT1, Alluvial Fan, using ISPs LUads. Landslide forms are overlaid as white lines.*



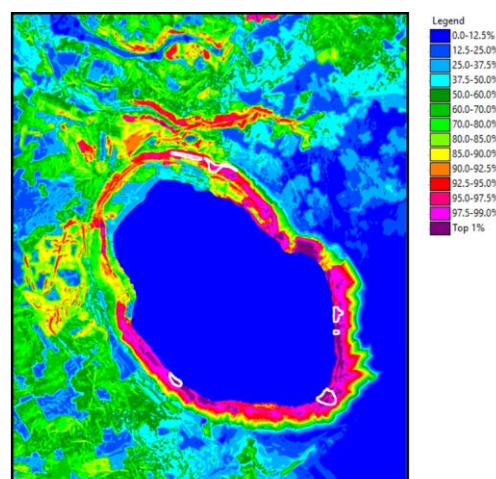
**Figura 34** Pattern di predizione ELR di PT2 - Complex Origin Fan con ISP LUads. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 34 ELR prediction pattern of PT2, Complex Origin Fan, using ISPs LUads. Landslide forms are overlaid as white lines.*

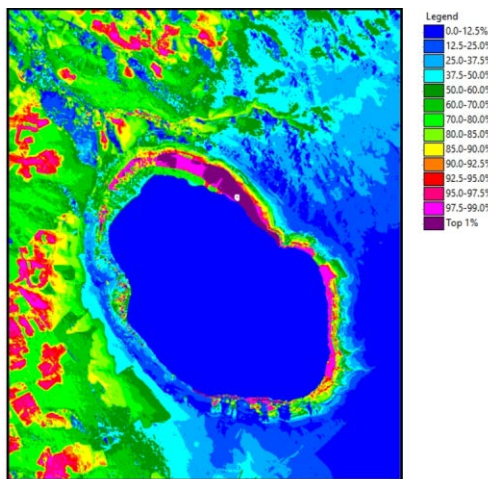


**Figura 35** Pattern di predizione ELR di PT3 - Rockfall Topple Debris con ISP LUads. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 35 ELR prediction pattern of PT3, Rockfall Topple Debris, using ISPs LUads. Landslide forms are overlaid as white lines.*

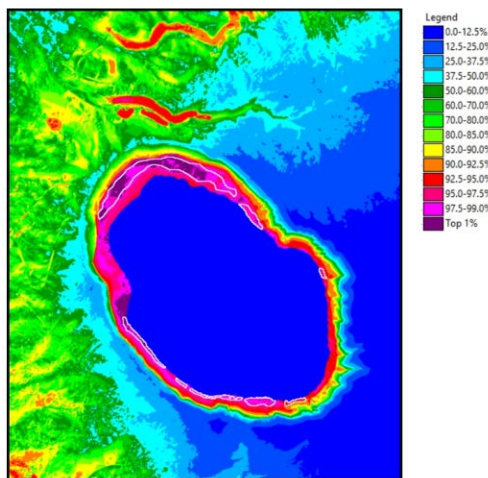






**Figura 36** Pattern di predizione ELR di **PT4** - Rockslide Accumulation con ISP **LUads**. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 36 ELR prediction pattern of **PT4**, Rockslide Accumulation, using ISPs **LUads**. Landslide forms are overlaid as white lines.*

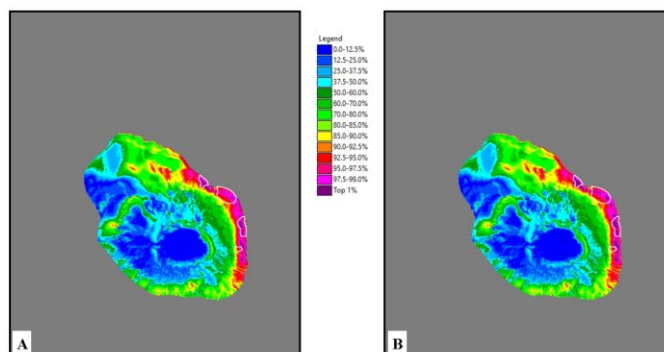


**Figura 37** Pattern di predizione ELR di **PT5** - Talus Deposit con ISP **LUads**. Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

*Figure 37 ELR prediction pattern of **PT5**, Talus Deposit, using ISPs **LUads**. Landslide forms are overlaid as white lines.*

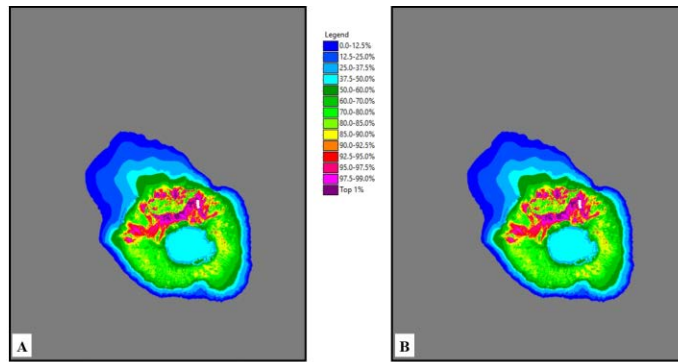
### 5.2.6 Esperimenti per le Forme poligonali subacquee PA1-PA4

Nelle Figure 38-41 osserviamo i test per i pattern di predizione dell'Empirical Likelihood Ratio per gli Indirect Supporting Pattern (ISP) Esposizione dei versanti (a), DTM (d), Pendenza (s) e degli ISP derivati dal DTM Curvatura (c), Profilo (p), Planform (f), per le Forme di frana poligonali subacquee **PA1-PA4**. A sinistra abbiamo i pattern generati usando i sei ISP **adscpf** e a destra quelli generati usando solo i tre ISP **ads**, al fine di mostrare l'impatto di **cpf**.

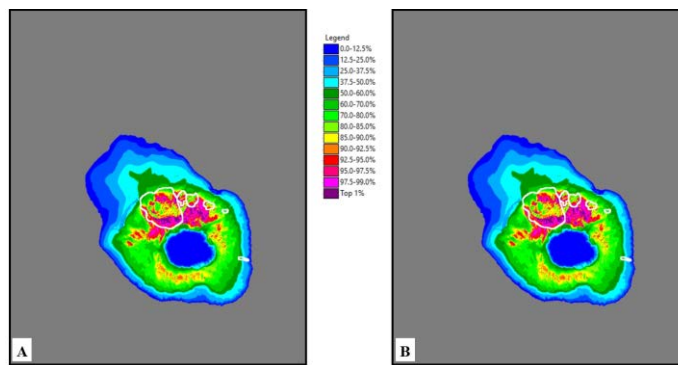


**Figura 38** Pattern di predizione ELR di **PA1** - Block Field, con ISP **adscpf** in (A) e **ads** in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.

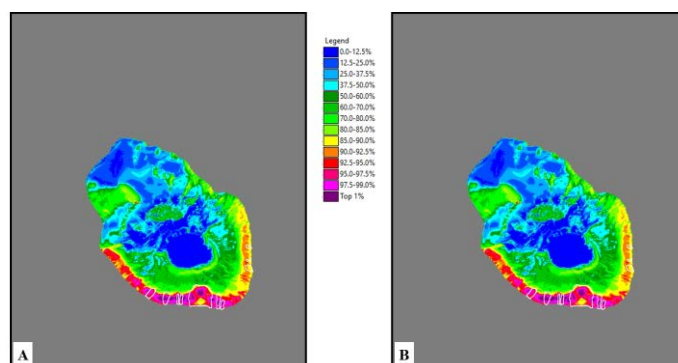
*Figure 38 ELR prediction pattern of **PA1**, Block Field, using ISPs **adscpf**, in (A), and **ads** in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.*



**Figura 39** Pattern di predizione ELR di PA2 - Isolated Rock Block con ISP *adscpf* in (A) e con *ads* in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.  
**Figure 39** ELR prediction pattern of PA2, Isolated Rock Block, using ISPs *adscpf*, in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.



**Figura 40** Pattern di predizione ELR di PA3 - Subaqueous Landslide Accumulation con ISP *adscpf* in (A) e con *ads*, in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.  
**Figure 40** ELR prediction pattern of PA3, Subaqueous Landslide Accumulation, using ISPs *adscpf*, in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.



**Figura 41** Pattern di predizione ELR di PA4 - Submerged Prosecution of Subaereal Accumulation con ISP *adscpf* in (A) e con *ads* in (B). Le forme di frana sono sovrapposte come linee bianche.  
**Figure 41** ELR prediction pattern of PA4, Submerged Prosecution of Subaereal Accumulation, using ISPs *adscpf*, in (A), and *ads* in (B). Landslide forms are overlaid as white lines.

## 6. Conclusioni

Il Lago Albano è un lago di origine vulcanica che appartiene al distretto vulcanico quaternario dei Colli Albani, situato in una vasta area a circa 20 km a SE del centro metropolitano di Roma. L'edificio vulcanico che ospita il lago è caratterizzato da fianchi esterni gentilmente inclinati e da elevate pendenze in corrispondenza delle pareti interne del cratere, dove sono evidenti i segni di numerose frane sia subaeree sia subacquee.

La presenza di numerose abitazioni e attività ricreative lungo le pendici interne del cratere, in particolare lungo il bordo e lungo la costa del lago, rendono l'area potenzialmente ad alto rischio non solo per i fenomeni di instabilità dei versanti interni, ma anche per gli effetti secondari dovuti alle onde di tsunami che potrebbero generarsi in seguito all'impatto delle masse di terreno subaereo in frana sulla superficie del lago o che potrebbero essere causati da movimenti di massa subacquei.

Scopo del presente lavoro è stata la valutazione della pericolosità di frana dell'area di studio utilizzando le tecniche del metodo dei minimi quadrati OLS (*Ordinary Least Squares*) e del rapporto empirico di verosimiglianza ELR (*Empirical Likelihood Ratio*).

Il modello proposto ha permesso di valutare le relazioni spaziali tra le frane e i tematismi di supporto all'analisi attraverso l'utilizzo dei software ArcGIS Pro e STM.

È stato misurato e valutato il rapporto tra ogni specifico tipo di frana e ogni mappa digitale di supporto: per il pattern della Litologia l'analisi ha messo in evidenza una forte relazione con le classi Scorie/lapilli, (Classe 4, Figura 6); per il pattern dell'Uso del suolo, con le classi Insediamento produttivo e Copertura vegetale arbustiva e/o erbacea (Classi 9 e 10, Figura 6); alcuni intervalli di quota elevati, oltre i 500 m, hanno una relazione evidente con la maggioranza delle forme di frana; le pendenze sembrano essere direttamente proporzionali ai ranghi più elevati delle mappe dei pattern di predizione; la relazione tra l'esposizione dei versanti e le frane sembra variare più casualmente nell'area di studio (vedi Figura 6). Inoltre, la carta dell'uso del suolo a disposizione non definisce classi facilmente collegabili con i processi franosi.

Il modello sviluppato potrebbe beneficiare dall'aggiunta di nuove informazioni di supporto all'analisi quali un rilievo morfologico Lidar dei versanti interni del cratere o di immagini telerilevate ad alta risoluzione, che permetterebbero di correggere possibili errori di posizionamento delle frane cartografate, dovuti anche alle differenti basi topografiche utilizzate. In generale, anche dati più dettagliati, come una litologia a scala più idonea all'area di studio, insieme alle informazioni sulla capacità di infiltrazione dei vari litotipi e sull'idrogeologia dell'area permetterebbero sicuramente di migliorare i risultati del modello proposto.

*Rapporto prodotto nell'ambito della Convenzione INGV-DPC, Allegato B2 2019-2021, WP2, Task 17.*

## Bibliografia

- Amato A., Chiarabba C., Cocco M., Di Bona M., Selvaggi G., (1994). *The 1989-1990 seismic swarm in the Alban Hills volcanic area, central Italy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 61: 225-237.
- Amato A., Chiarabba C., (1995). *Recent uplift of the Alban Hills Volcano (Italy): evidence for magmatic inflation?* Geophysical Research Letters, 22: 1985-1988.
- Anzidei M., Esposito A., De Giosa F., (2007). *The dark side of the Albano crater lake*. Annals of Geophysics, 49: 1275-1287.
- Anzidei M., Carapezza M.L., Esposito A., Giordano G., Lelli M., Tarchini L., (2008). *The Albano Maar Lake high resolution bathymetry and dissolved CO<sub>2</sub> budget (Colli Albani volcano, Italy): Constraints to hazard evaluation*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 171, 3-4: 258-268.

- Anzidei M., Esposito A., (2010). *Lake Albano: Bathymetry and level changes*. In: Funicciello R., Giordano G. (Eds). *The Colli Albani Volcano*. London, Geological Society. Special Publications of IAVCEI, 3: 229-244.
- Barberi F., Chelini F., Marinelli G., Martini M., (1989). *The gas cloud of Lake Nyos (Cameroon, 1986): results of the Italian technical mission*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39: 125-134.
- Bozzano F., Mazzanti P., Anzidei M., Esposito C., Floris M., Bianchi Fasani G., Esposito A., (2009). *Slope dynamics of Lake Albano (Rome, Italy): insights from high resolution bathymetry*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1469-1486.
- Carapezza M.L., Tarchini L., (2007). *Magmatic degassing of the Alban Hills volcano (Rome, Italy): geochemical evidence from accidental gas emission from shallow pressurized aquifers*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165: 5-16.
- Carapezza M.L., Lelli M., Tarchini L., (2008). *Geochemistry of the Albano and Nemi crater lakes in the volcanic district of Alban Hills (Rome, Italy)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178: 297-304.
- Carapezza M.L., Barberi F., Tarchini L., Ranaldi M., (2021). *Hazard from endogenous gas emissions and phreatic explosions in Rome city (Italy)*. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL089797. <https://doi.org/10.1029/2020GL089797>
- Chiarabba C., Amato A., Delaney P.T., (1997). *Crustal structure, evolution, and volcanic unrest of the Alban Hills, Central Italy*. *Bulletin of Volcanology*, 59: 161-170.
- Chondrogianni C., Ariztegui D., Niessen F., Ohlendorf C., Lister G., (1996). *Late Pleistocene and Holocene sedimentation in Lake Albano and Lake Nemi (central Italy)*. In: Guilizzoni G., Oldfield F, (Guest Eds). *Paleoenvironmental Analysis of Italian Crater Lake and Adriatic sediments*. *Memorie Istituto Italiano di Idrobiologia*, 55: 23-38.
- Chung C.J., (2006). *Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment*. *Computers and Geosciences*, 32: 1052-1068.
- Chung C.J., Fabbri A.G., (1993). *Representation of geoscience data for information integration*. *Natural Resources Research*, 2: 122-139.
- Chung C.J., Fabbri A.G., (2003). *Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping*. *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- Chung C.F., Fabbri A.G., (2004). *Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models*. In: Glade T., Anderson M.G., Crozier M.J. (Eds). *Landslide Hazard and Risk*. New York, John Wiley & Sons, pp. 139-174.
- Cruden D.M., Varnes D.J., (1996). *Landslide types and processes*. In: Turner A.K., Shuster R.L. (Eds). *Landslides Investigation and Mitigation*. Washington, DC. National Research Council. Transportation Research Board. Special Report, 247: 36-75.
- De Rita D., Funicciello R., Parotto M., (1988). *Carta Geologica del Complesso vulcanico dei Colli Albani (Geological map of the Colli Albani volcanic complex), scale 1:50.000*. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- De Rita D., Funicciello R., Rosa C., (1992). *Volcanic activity and drainage network evolution of the Alban Hills area (Rome, Italy)*. *Acta Vulcanologica*, 2: 185-198.
- De Rita D., Giordano G., Esposito A., Fabbri M., Rodani S., (2002). *Large volume phreatomagmatic ignimbrites from the Colli Albani volcano (Middle Pleistocene, Italy)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118: 77-98.
- Didenkulova I., Kurkin A., Pelinovsky E., (2006). *Tsunamis in Russian lakes and rivers*. *Geophysical Research Abstracts*, 8: 00140.
- Esposito A., Giordano G., Anzidei M., (2006). *The 2002-2003 submarine gas eruption at Panarea island (Aeolian archipelago, Italy): structure and volcanology of the seafloor and implications for hazard evaluation*. *Marine Geology*, 227: 119-134.



- Fabbri A.G., Chung C.J., (2018). *How credible is my hazard map? Dissecting a prediction pattern of landslide susceptibility*. WIT Transactions of Engineering Sciences, vol. 121, p. 3-19. www.witpress.com, ISSN 1743-3533 (on-line). doi:10.2495/RISK180011
- Fabbri A.G., Cavallin A., Patera A., Sangalli L., Chung C.J., (2017a). *Comparing Patterns of Spatial Relationships for Susceptibility Prediction of Landslide Occurrences*. In: Mikoš M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (Eds). *Advancing Culture of Living with Landslides: Advances in Landslide Science*, 2. Switzerland, Springer International Publishing, 2: 1135-1144.
- Fabbri A.G., Patera A., (2021). *Spatial Uncertainty of Target Patterns Generated by Different Prediction Models of Landslide Susceptibility*. Applied Sciences, 11, 3341.
- Fabbri A.G., Patera A. & Chung C.-J., (2017b). *Spatial target mapping: an approach to susceptibility prediction based on iterative cross-validations*. In, Alonso E., Corominas J. & Hürlimann H., (eds.). *Proceedings of IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Santander Spain 27-30, June 2017, Barcelona, Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)*, pp. 468-479.
- Freda C., Gaeta M., Karner D., Marra F., Renne P.R., Taddeucci J., Scarlato P., Christensen J.N., Dallai L., (2006). *Eruptive history and petrologic evolution of the Albano multiple maar (Alban Hills, Central Italy)*. Bulletin of Volcanology, 68, 6: 567-591.
- Funciello R., Giordano G., De Rita D., Carapezza M.L., Barberi F., (2002). *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*. Rendiconti dell'Accademia dei Lincei (Scienze Fisiche e Naturali) ser. 9, 13: 113-143.
- Funciello R., Giordano G., De Rita D., (2003). *The Albano maar lake (Colli Albani Volcano, Italy): recent volcanic activity and evidence of pre-Roman Age catastrophic lahar events*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 123: 43-61.
- Geist E.L., Jakob M., Wieczorek G.F., Dartnell P., (2003). *Preliminary Hydrodynamic Analysis of Landslide-generated Waves in Tidal Inlet, Glacier Bay National Park, Alaska*. Reston, VA. USGS. USGS Open-File Report 03-411.
- Giordano G., De Rita D., Cas R.A.F., (2002). *Valley pond and ignimbrite veneer deposits in the small volume phreatomagmatic "Peperino Albano" basic ignimbrite, Lago Albano maar, Colli Albani volcano, Italy: influence of topography*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 107: 131-144.
- Hubbard B., Heald A., Reynolds J.M., Quincey D., Richardson S.D., Zapata Luyo M., Santillan Portilla N., Hambrey M.J., (2005). *Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru*. Earth Surface Processes and Landforms, 30: 1251-1264.
- Jorstad F., (1968). *Waves generated by landslides in Norwegian fjords and lakes*. Norwegian Geotechnical Institute Publication, 69: 13-32.
- Karner D.B., Marra F., Renne P.R., (2001). *The history of the Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 107: 185-219.
- Marra F., Karner D.B., (2005). *The Albano maar (Alban Hills volcanic district, Italy): active or dormant volcano?* Il Quaternario, 18, 2: 173-185.
- Mazzanti P., Bozzano F., Esposito C., (2007). *Submerged Landslide Morphologies In The Albano Lake (Rome, Italy)*. In: Lykousis V., Sakellariou D., Locat J. (Eds). *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Dordrecht. Springer. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 27.
- Mulder T., Cochonat P., (1996). *Classification of offshore mass movements*. Journal of Sedimentary Research, 66, 1: 43-57.
- Panizzo A., De Girolamo P., Di Risio M., Maistri A., Petaccia A., (2005). *Great landslide events in Italian artificial reservoirs*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5: 733-740.
- Plafker G., Eyzaguirre V.R., (1979). *Rock avalanches and wave at Chungar, Peru*. In: Voight B. (Ed).

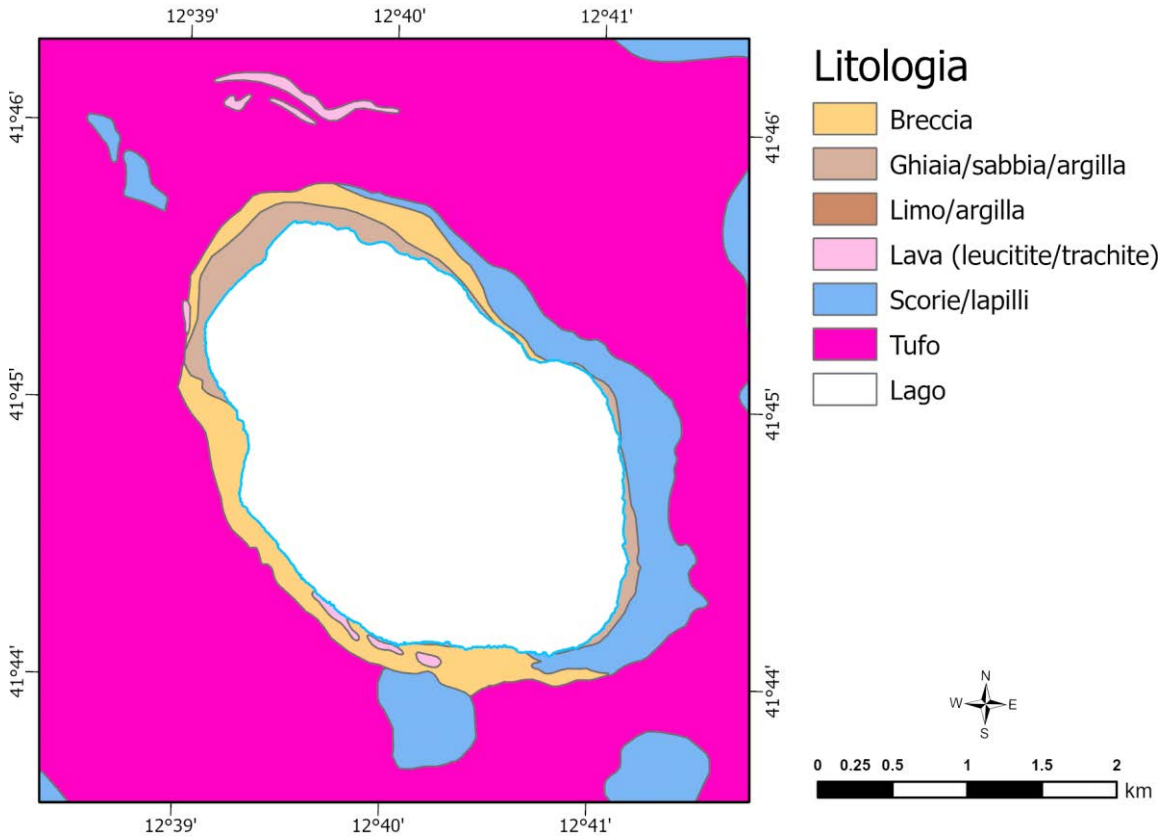
- Rockslides and Avalanches. Amsterdam. Elsevier. Engineering Sites, 2: 269-279.
- Praturlon A., Cecili A., Campolunghi M.P., Cinnirella A., Fabbri M., Capelli G., Mazza R., Catalano G., Meloni F., (2002). *Realizzazione della Carta Litologica con elementi strutturali in formato digitale della Regione Lazio*. Roma. Regione Lazio, Università degli Studi di Roma Tre.
- Schnellmann M., Anselmetti F.S., Giardini D., McKenzie J.A., Ward S.N., (2002). *Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits*. *Geology*, 30, 12: 1131-1134.
- Sigurdsson H., Devine J.D., Tchova F.M., Presser T.S., Pringle M.K.W., Evans W.C., (1987). *Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroon*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31: 1-16.
- Steger S., Brenning A., Bell R., Glade T., (2016). *The propagation of inventory-based positional errors into statistical landslide susceptibility models*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 2729-2745.
- Trigila R., (1995). *The volcano of the Alban Hills*. Roma, Tipografia SGS, pp. 283.
- Villa I.M., Calanchi N., Dinelli E., Lucchini F., (1999). *Age and evolution of the Albano crater lake (Roman Volcanic Province)*. *Acta Vulcanologica*, 11: 305-310.
- Wagner T.P., McKee C.O., Kuduon J., Kombua R., (2003). *Landslide-induced wave in a small volcanic lake: Kasu Tephra Cone, Papua New Guinea*. *International Journal of Earth Sciences*, 92: 405-406.

# APPENDICE A

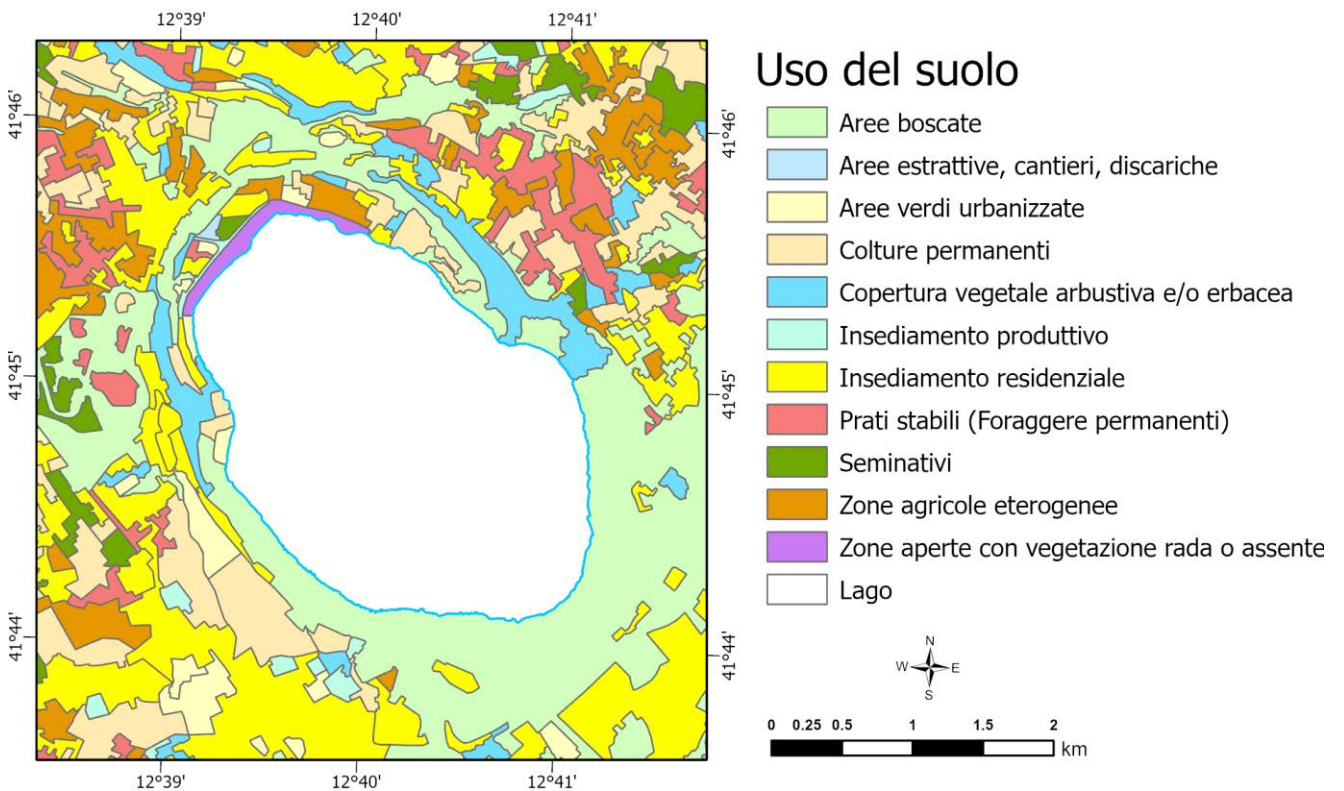
## Tematismi utilizzati nell'analisi



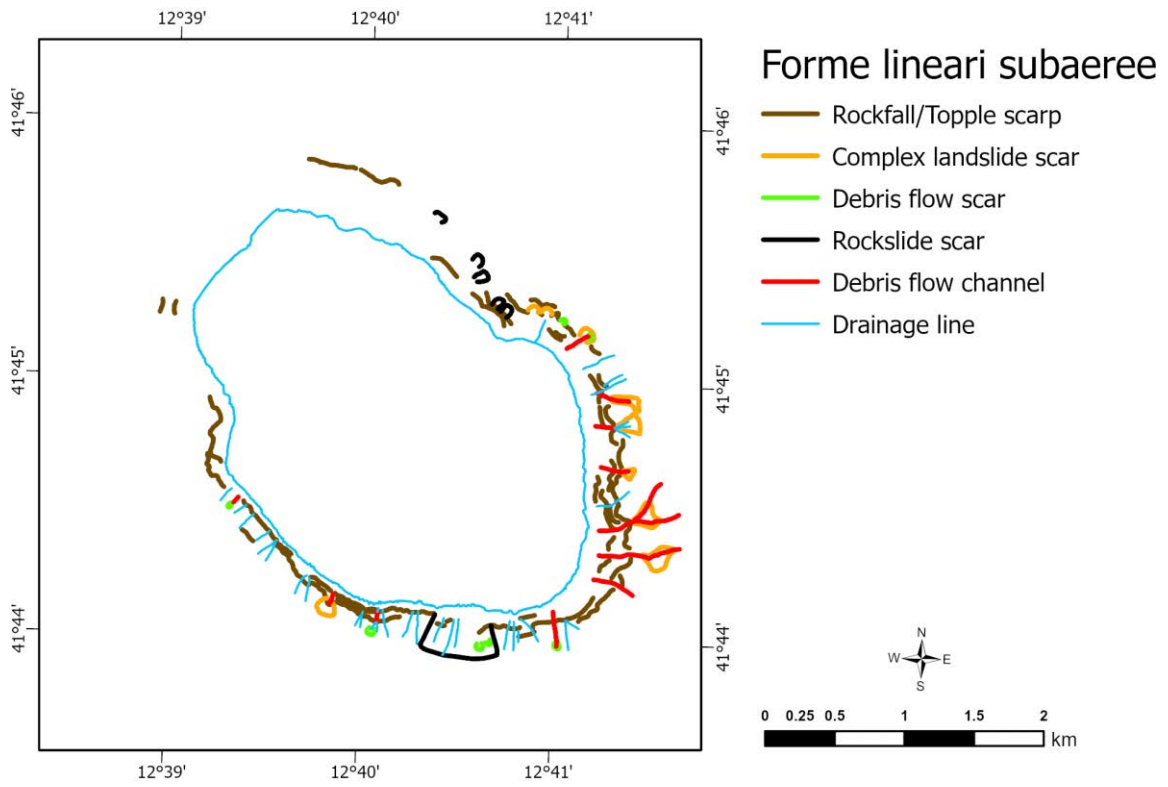




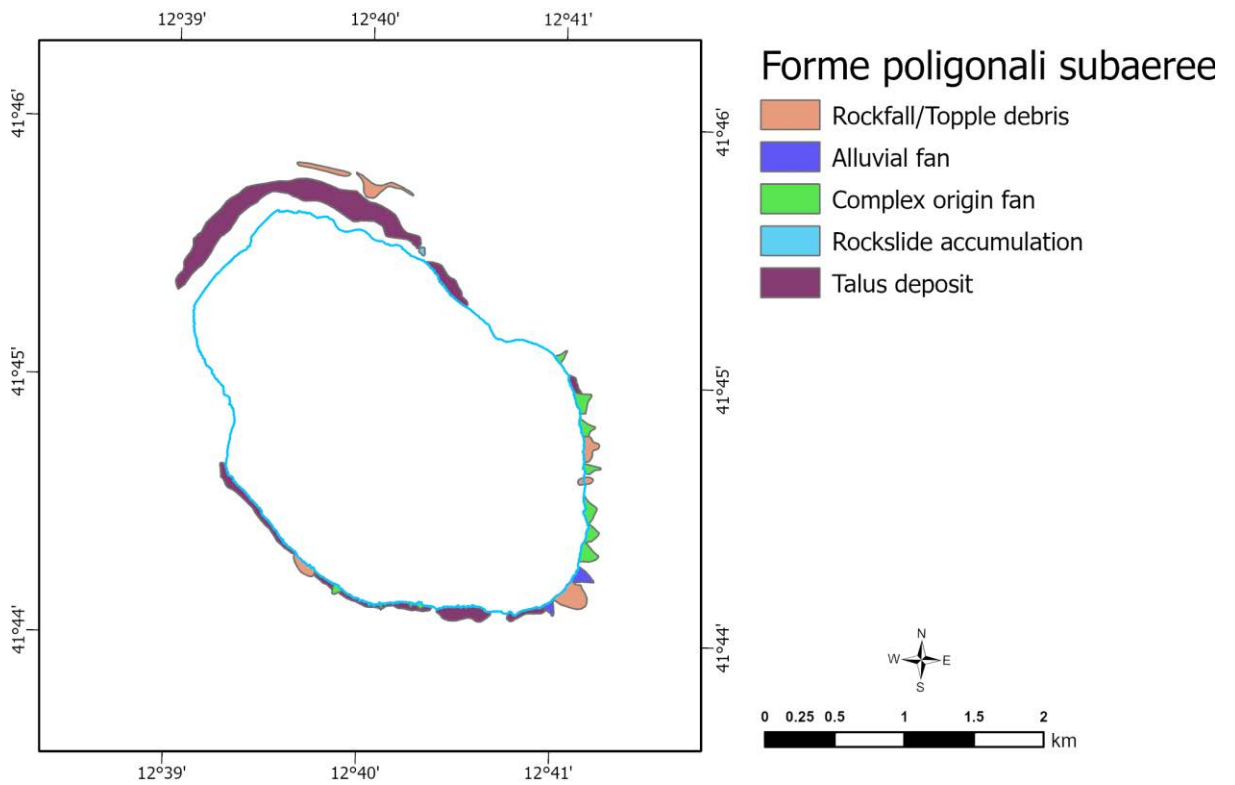
Litologia | *Lithology*



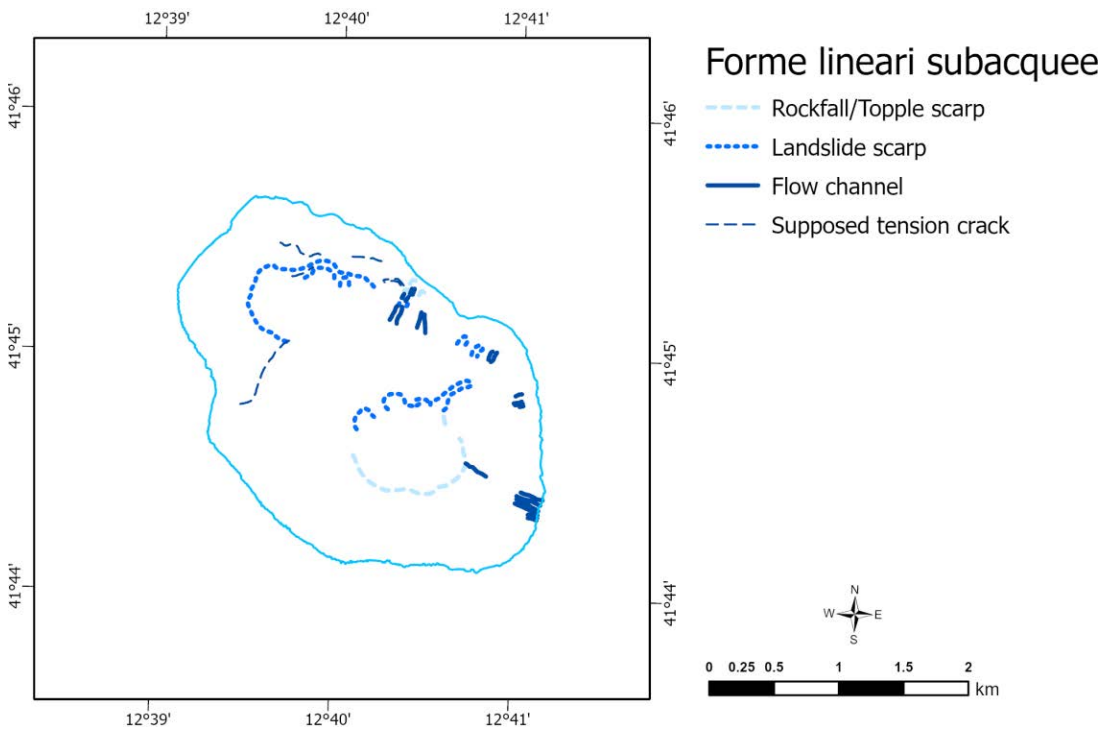
Uso del suolo | *Landuse*



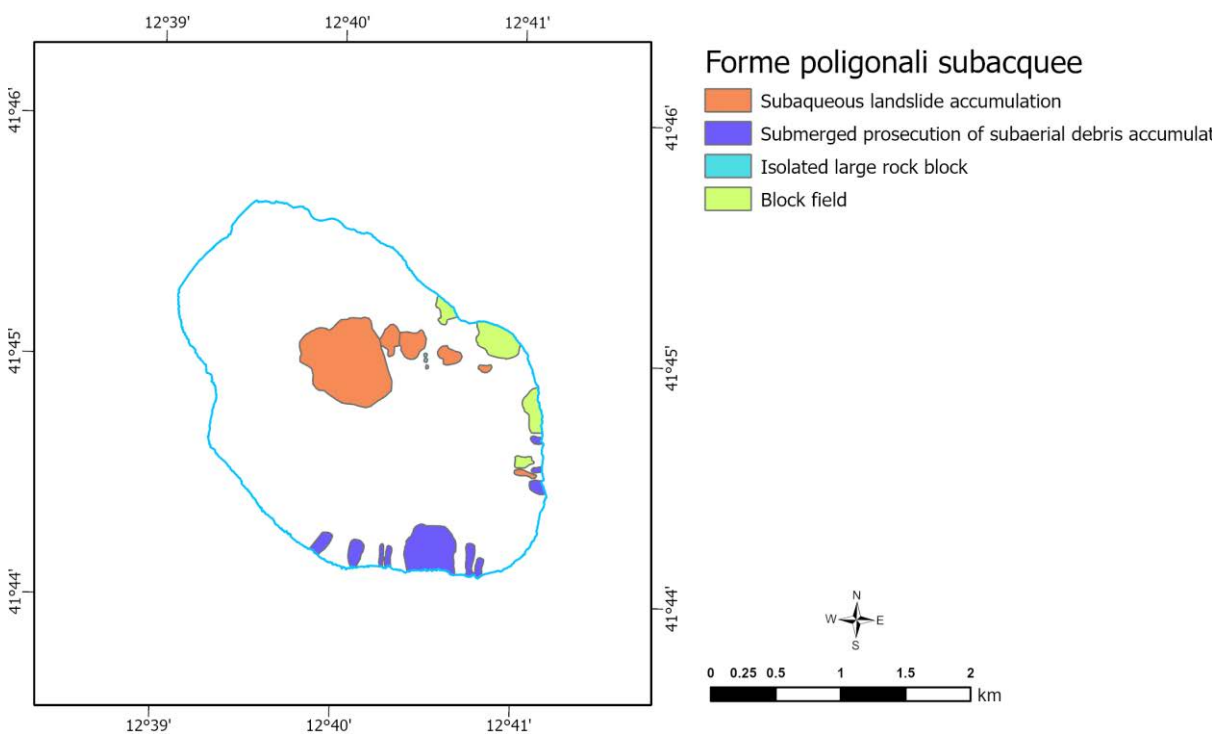
Forme lineari subaeree | *Linear subaerial forms*



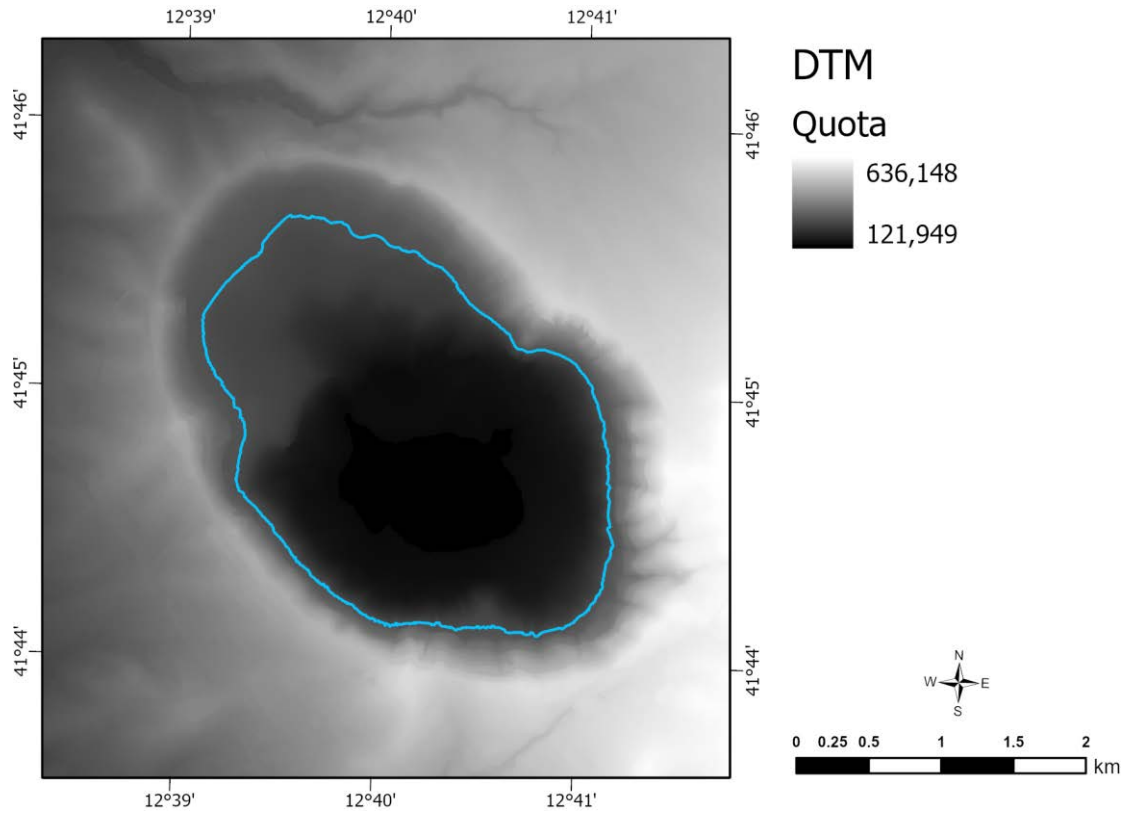
Forme poligonali subaeree | *Polygonal subaerial forms*



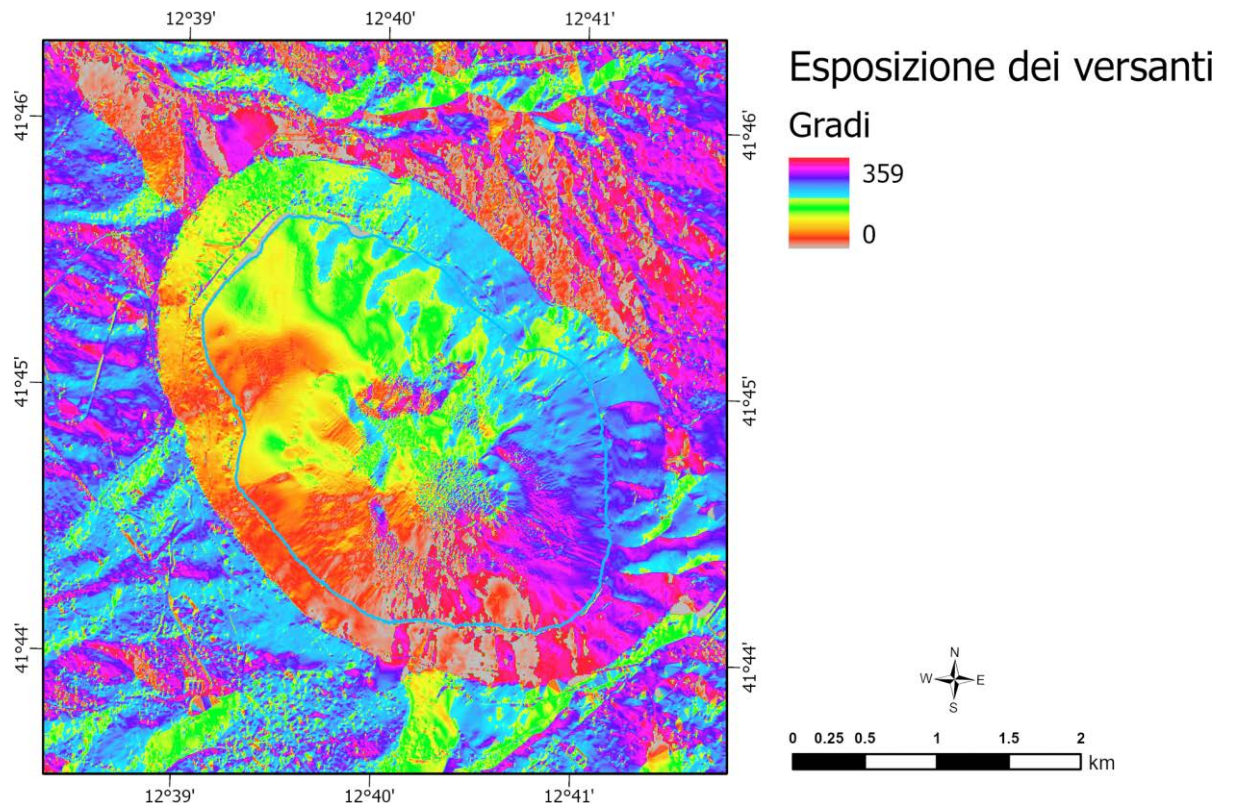
Forme lineari subacquee | *Submerged linear forms*



Forme poligonali subacquee | *Submerged polygonal forms*

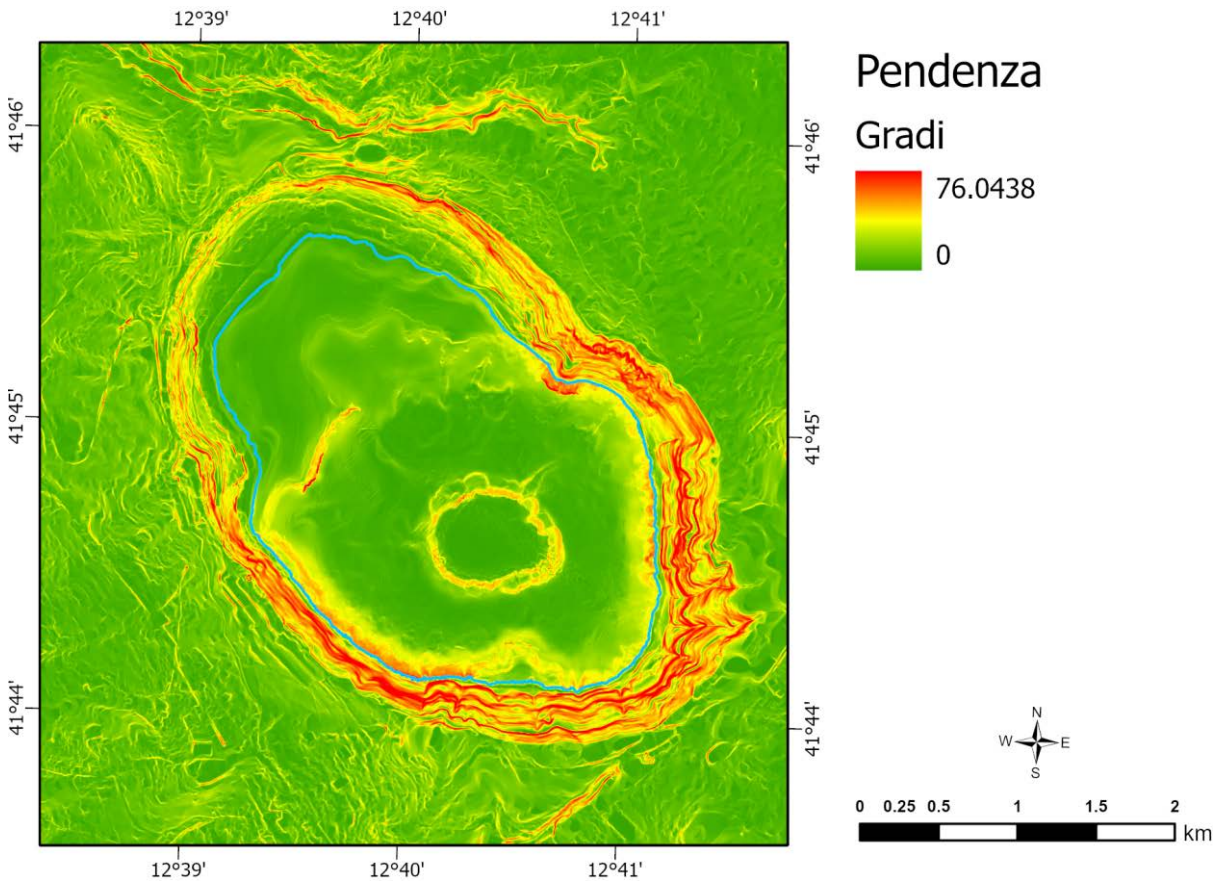


Modello digitale del terreno | *Digital Terrain model*

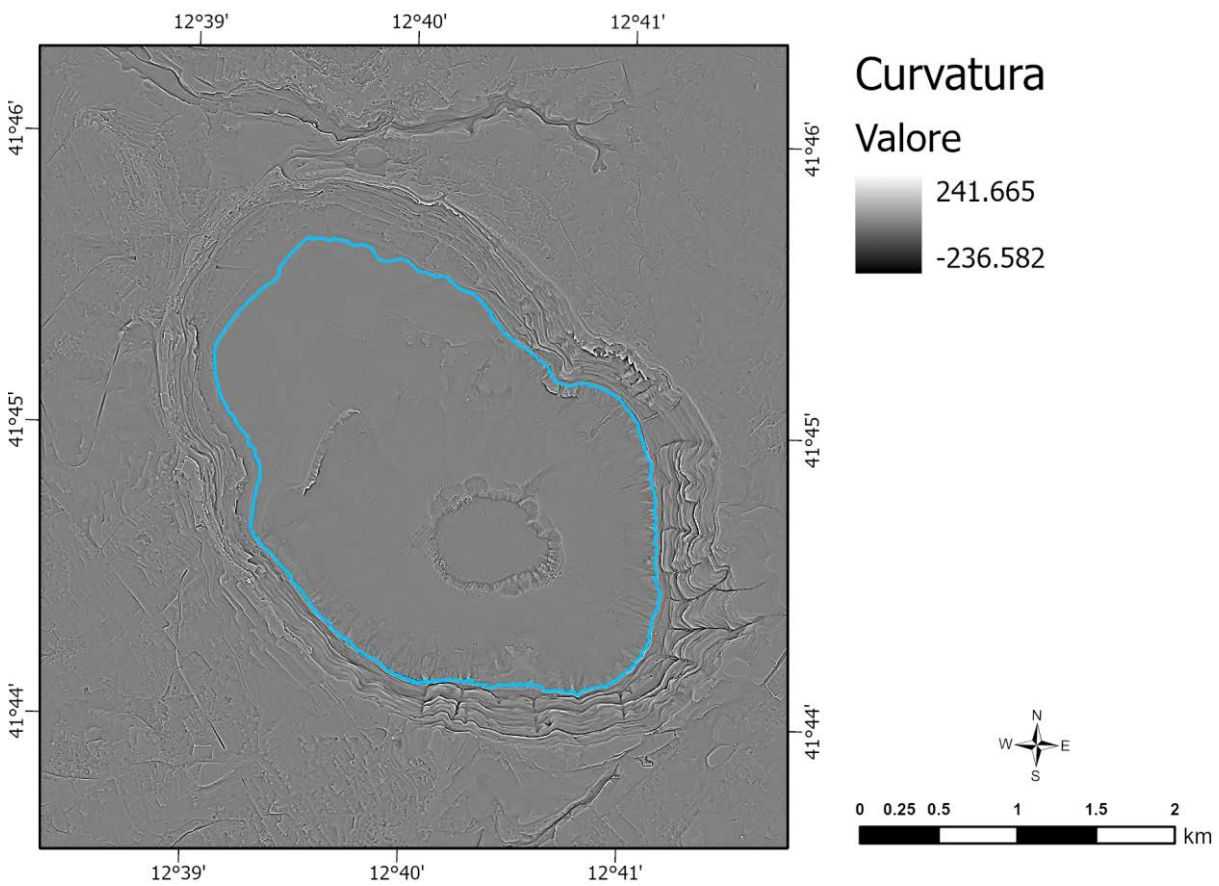


Esposizione dei versanti | *Aspect*

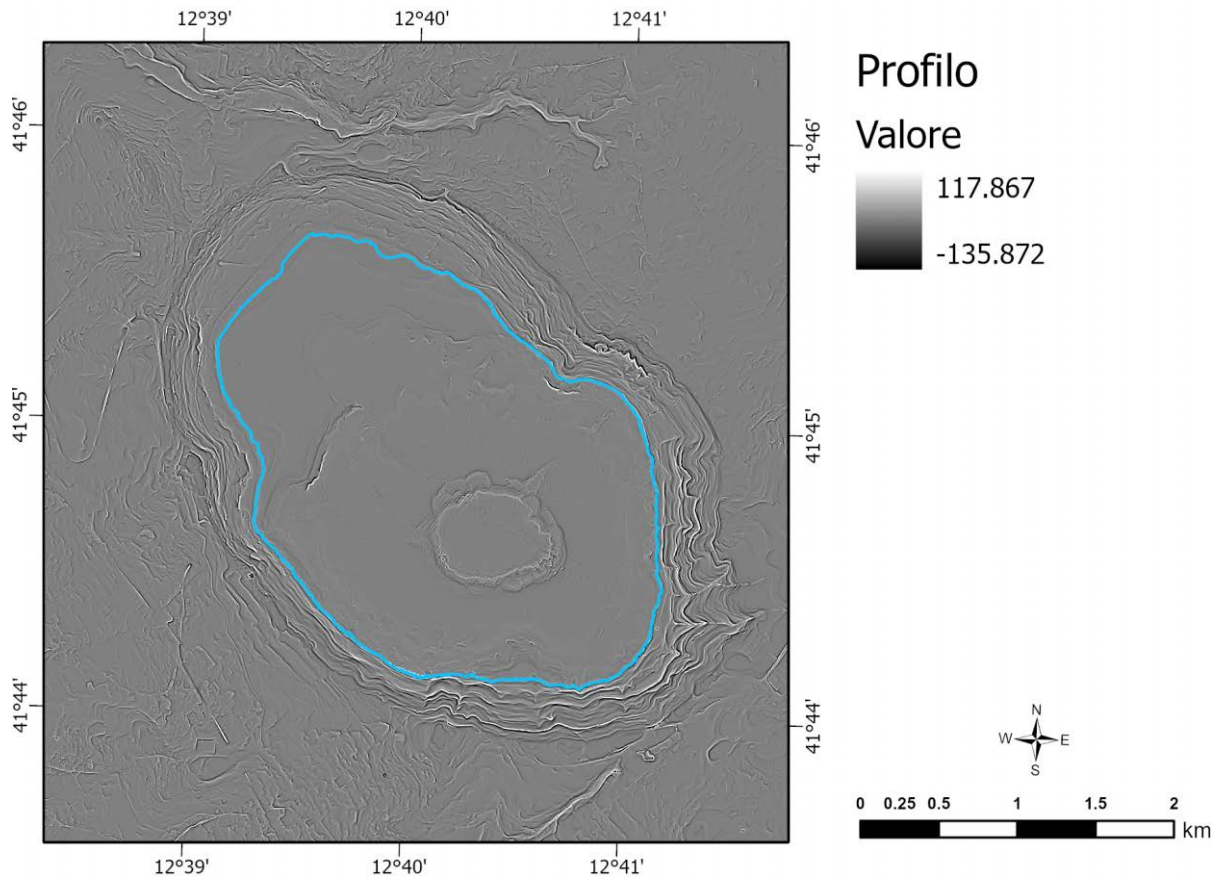




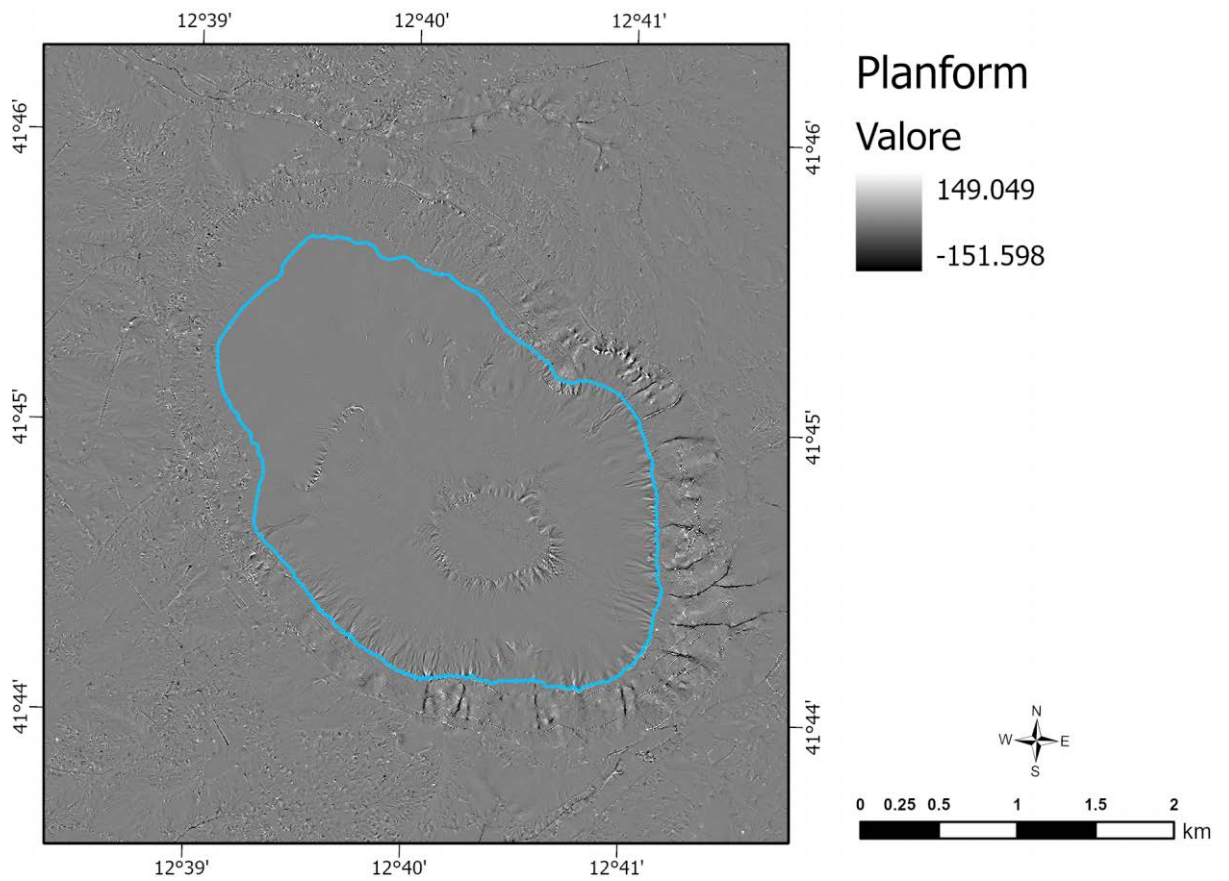
Pendenza | Slope



Curvatura | Curvature



Profilo | Profile



Planform | Planform





# QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

# RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

# MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

[http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html](http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html/)

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

**Coordinamento editoriale**

Francesca DI STEFANO  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

**Progetto grafico**

Barbara ANGIONI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

**Impaginazione**

Barbara ANGIONI  
Patrizia PANTANI  
Massimiliano CASCONI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

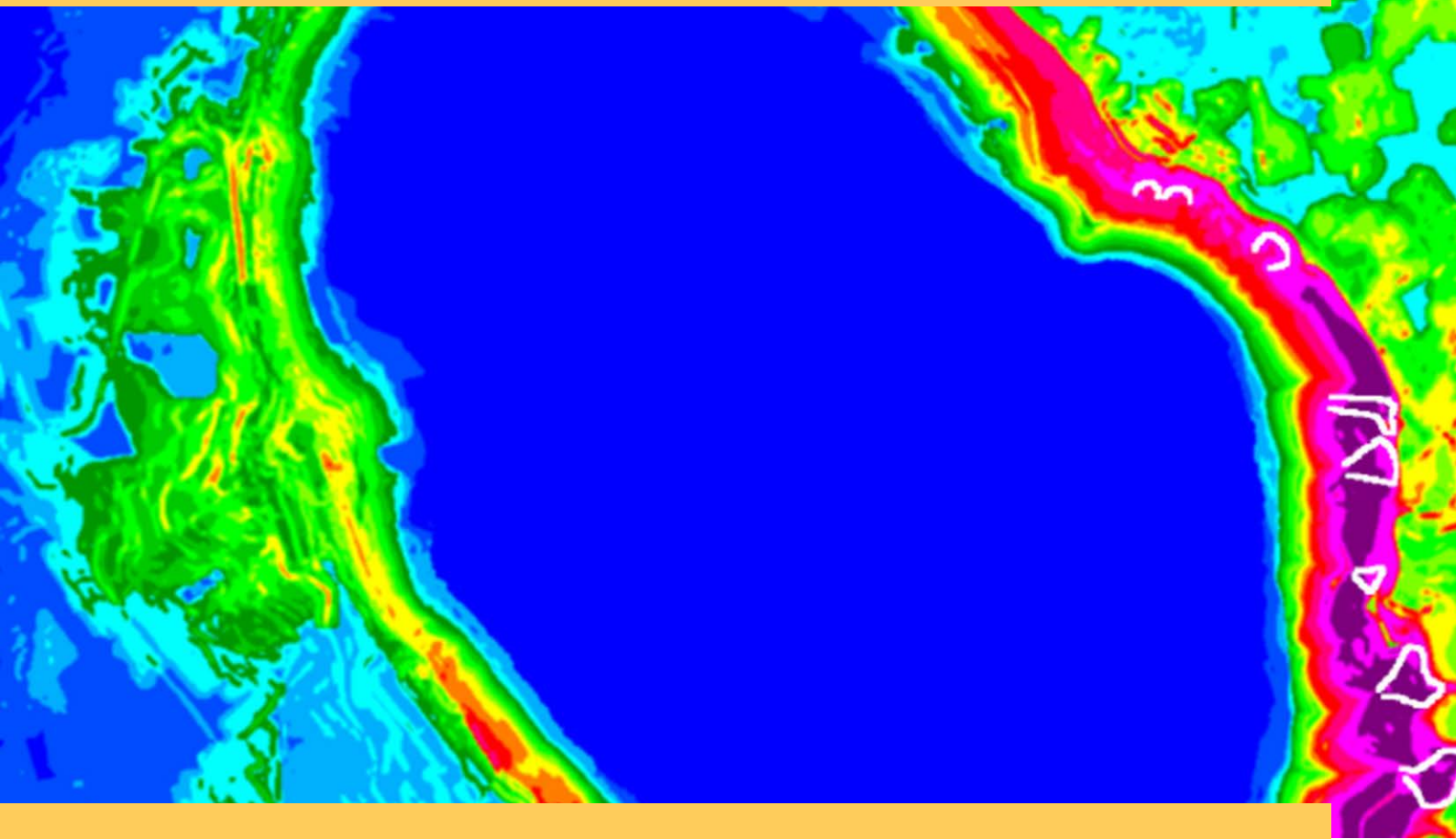
©2023

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia  
Via di Vigna Murata, 605  
00143 Roma  
tel. +39 06518601

[www.ingv.it](http://www.ingv.it)



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

