Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
134° (2016), Vol. XL, Parte II, pp. 79-97

MASSIMO CONFORTI[1] – FRANCESCO MUTO[2] – VALERIA RAGO[3]
SALVATORE CRITELLI[2] – PASQUALE VERSACE[4]

Suscettibilità di Frana sulle Grandi Vie di Comunicazione: Caso di Studio Autostrada A3, Tratto Cosenza Sud – Altilia (Calabria Settentrionale)*

Riassunto – Lo scopo di questo studio è quello di valutare la suscettibilità di frana lungo il tratto di autostrada A3 – Salerno-Reggio Calabria – compreso tra gli svincoli di Cosenza Sud e Altilia (Calabria settentrionale), utilizzando un metodo di analisi statistica condizionale. Il lavoro si articola in diverse fasi, comprendenti l'acquisizione, l'organizzazione e la successiva elaborazione dei dati in ambiente GIS. Inizialmente è stata redatta una carta inventario delle frane, ottenuta dall'interpretazione di foto aeree di anni diversi e da un dettagliato rilevamento di terreno. Sono stati cartografati 844 fenomeni franosi le cui tipologie di movimento più ricorrenti sono scorrimenti, frane complesse e, subordinatamente, colamenti. Per stimare e validare la suscettibilità di frana, i fenomeni franosi mappati sono stati suddivisi in due gruppi. Un gruppo (*training set*) è stato utilizzato per l'analisi di suscettibilità, mentre il secondo gruppo (*testing set*) è servito per validare la carta di suscettibilità. Litologia, faglie, uso del suolo e una serie di parametri topografici quali pendenza, esposizione dei versanti, curvatura planare dei versanti e *stream power index* (SPI), sono stati assunti come fattori predisponenti le frane. Per valutare la suscettibilità di frana, il metodo di analisi statistica condizionale è stato applicato alle «Unità di Condizioni Uniche» (UCU), definite dalla combinazione dei fattori predisponenti selezionati. Successivamente, è stata calcolata la densità di frana all'interno di ogni UCU che rappresenta la probabilità che si verifichi una frana in quella determinata combi-

[1] CNR – Istituto per Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo (ISAFOM), Via Cavour 4/6, 87036 Rende (CS). E-mail: massimo.conforti@isafom.cnr.it

[2] Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST), Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS).

[3] CNR – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologia (IRPI), Via Cavour 4/6, 87036 Rende (CS).

[4] Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronica e Sistemistica (DIMES), Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS).

* La relazione è stata presentata nell'ambito della giornata di studio su: «Rischio Idrogeologico. Previsione, Prevenzione e Controllo», Arcavacata di Rende, 8 aprile 2016.

nazione di fattori predisponenti. A ciascuna UCU viene dunque assegnato un valore di suscettibilità di frana in funzione della densità di area in frana calcolata. Il risultato dell'analisi è stato una classificazione dell'area di studio in quattro classi di suscettibilità (bassa, moderata, alta e molto alta). I risultati evidenziano che il 33% dell'area indagata è caratterizzata da valori di suscettibilità alta e molto alta. La validazione del modello di suscettibilità di frana, è stata effettuata tramite la realizzazione e l'analisi di due curve: la *prediction rate* e la *success rate*. La prima esprime il tipo di correlazione fra le classi di suscettibilità e l'instabilità gravitativa «futura», la seconda permette di stimare la bontà (*goodness of fit*) del modello predittivo. I risultati mostrano che l'area sottesa dalla curva (AUC) per la curva *success rate* è 0,82, mentre per la curva *prediction rate* è 0,78. Questi valori indicano che il modello ha un'elevata capacità predittiva. Inoltre, la bontà del metodo è supportata anche dal fatto che circa il 75% delle frane del *testing set* è correttamente classificato, ricadendo nelle aree mappate con suscettibilità alta e molto alta. Infine, la carta di suscettibilità redatta fornisce le informazioni di base per ulteriori valutazioni della pericolosità da frana e del rischio connesso.

Parole chiave: geomorfologia, GIS, analisi statistica condizionale, suscettibilità di frana, Calabria.

Abstract – The proposed study is aimed at the evaluation and mapping of the landslide susceptibility along a sector of highway «A3 (Salerno-Reggio Calabria)» between Cosenza Sud and Altilia, northern Calabria, using a GIS-based Conditional Analysis method. Landslide inventory map of the area was obtained by detailed field survey and air-photo interpretation. Altogether, 844 landslides were mapped. The types of movement are mainly slides, complex landslides and, subordinately, flows. In order to estimate and validate landslide susceptibility, the landslides were divided in two group. One group (training set) was used to prepare susceptibility map and the second group (testing set) to validate the map. Lithology, distance from tectonic elements, land use, slope, aspect, plan curvature and Stream Power Index (SPI), were assumed as landslide predisposing factors. In order to evaluate landslide susceptibility Conditional Analysis was applied to Unique Conditions Units (UCUs) that are a unique combination of the predisposing factors. Subsequently, the landslide area is determined within each UCU and the landslide density is computed. The outcome of the study was a classification of the study area into four susceptibility classes, ranked from low to very high. The results showed that the 33% of the study area is characterized by a high to very high degree of susceptibility. The overlay of the landslides of testing set with the susceptibility map, showed that over 75% of the landslides is correctly classified, falling in high and very high susceptibility classes. Prediction performances of this map is checked by using both success rate curve and prediction rate curve. The validation results showed that, area under the curve (AUC) for success rate curve was 0.82 whereas for the prediction rate curve was 0.78. Therefore, prediction rate curve revealed that model has good prediction performance. Finally, the landslide susceptibility map provides the baseline information for further evaluations of landslide hazards and related risks.

Key words: geomorphology, GIS, conditional analysis, landslide susceptibility, Calabria.

1. Introduzione

La Calabria è una delle regioni d'Italia maggiormente colpite da fenomeni franosi che provocano notevoli danni a insediamenti e infrastrutture mettendo, in molti casi, a rischio l'incolumità delle persone. Questa elevata franosità risulta favorita

dalle peculiari caratteristiche geologico-geomorfologiche della regione, diffusamente interessata da dislocazioni tettoniche attive e forti terremoti oltre che da condizioni climatiche contraddistinte da ricorrenti eventi estremi (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996; Tansi *et al.*, 2000; Gullà *et al.*, 2008; Conforti *et al.*, 2011; Conforti *et al.*, 2014b; Tansi *et al.*, 2016).

Nella presente nota, sono riportati i risultati di uno studio finalizzato alla valutazione della suscettibilità di frana lungo il tratto di autostrada A3 – Salerno-Reggio Calabria – compreso tra gli svincoli di Cosenza Sud e Altilia (Calabria settentrionale). In particolare, i dati del rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio nell'area sono stati elaborati in ambiente GIS mediante l'applicazione di un metodo statistico, denominato «analisi condizionale» (Carrara *et al.*, 1995, Clerici *et al.*, 2002) con l'obiettivo di realizzare una carta della suscettibilità di frana.

2. Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico

Il tratto autostradale A3 oggetto di studio si sviluppa per circa 26.5 km in direzione approssimativamente N-S attraverso il bacino del Fiume Crati a nord e quello del Fiume Savuto a sud, con lo spartiacque posto nei pressi di Piano Lago (Fig. 1). Le quote sono comprese tra 160 m e 760 m s.l.m.

L'area investigata ricade nella parte meridionale del Graben del Crati (Lanzafame & Tortorici, 1981; Tortorici, 1981), una depressione tettonica formatasi a partire dal Pliocene Superiore, riempita da depositi marini e continentali e delimitata da un sistema di faglie orientate N-S, coniugate rispetto a quelle che delimitano la Catena Costiera verso ovest e il Massiccio della Sila verso est. Tali faglie, contraddistinte da estensione pluri-chilometrica e rigetti cumulati dell'ordine di alcune centinaia di metri, risultano tettonicamente attive, come dimostrato dalla localizzazione degli epicentri di terremoti storici (Tansi *et al.*, 2016). La parte occidentale dell'area di studio è attraversata da sistemi di faglie regionali orientati NO-SE quali quello di Falconara-Carpanzano (Van Dijk *et al.*, 2000) e quello, poco più a sud, di Amantea-Gimigliano (Tansi *et al.*, 2007).

Dal punto di vista litologico, nell'area studiata affiorano principalmente rocce cristallino- metamorfiche, depositi del Miocene superiore, riconducibili alle successioni di riempimento di bacini sedimentari peritirrenici del settore occidentale della Calabria settentrionale, e depositi marini del Pleistocene inferiore.

I litotipi presenti nell'area sono sintetizzati in:

– scisti e gneiss da grigio chiari a biancastri, costituiti prevalentemente di quarzo, feldspato e muscovite; questi litotipi presentano, localmente, un'elevata deformazione fragile che si accentua nelle zone di faglia, dove spesse aree di *gouge* tettonico conferiscono alla roccia una tessitura brecciata e cataclastica;

– rocce metamorfiche costituite da paragneiss e scisti biotitici, spesso con granati visibili ad occhio nudo, gneiss granitoidi e rocce granitiche; sporadicamente sono presenti zone di gneiss basici anfibolici cui si intercalano localmente corpi len-

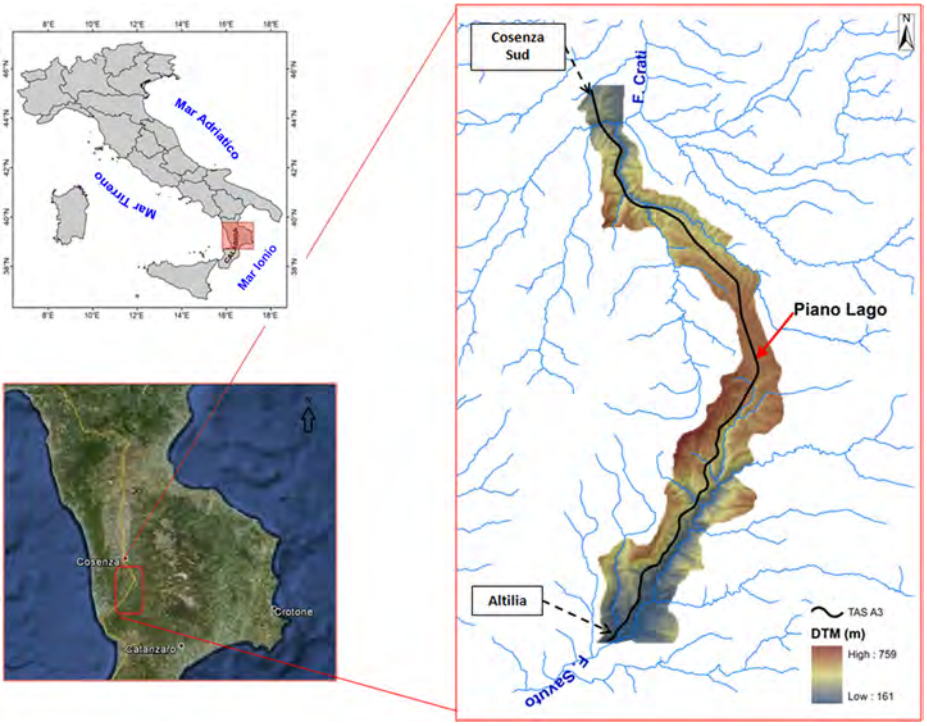

Fig. 1. Ubicazione dell'area di studio con il tratto di autostrada studiato (in legenda TAS A3).

ticolari di metacalcari e marmi, talora profondamente alterati e quindi facilmente disgregabili;

– scisti filladici grigi, costituiti prevalentemente da quarzo, muscovite, sericite e clorite; le rocce contengono generalmente vene e segregazioni di quarzo parallele alla scistosità e risultano fortemente alterate nelle zone di taglio di elementi tettonici significativi;

– conglomerati miocenici con grossi ciottoli, ben arrotondati, di rocce ignee e metamorfiche in una matrice sabbiosa e con occasionali lenti di sabbie;

– sabbie e arenarie del Pleistocene inferiore con colorazione da bruno chiaro a biancastre, a grana da fine a grossolana.

Ai fini del presente lavoro tutti i litotipi affioranti nell'area di studio sono stati raggruppati in 11 diverse unità litologiche (Fig. 2).

La geomorfologia dell'area di studio si presenta molto articolata ed è controllata, essenzialmente, dall'assetto lito-strutturale, dall'attività tettonica, dall'erosione fluviale e dai processi di degradazione meteorica e gravitativi di versante (Le Pera & Sorriso-Valvo, 2000). L'attività tettonica, in particolare, ha generato discontinuità altimetriche e plano-altimetriche di crinale, selle morfologiche lungo le creste e faccette triangolari e trapezoidali sui principali versanti di faglia.

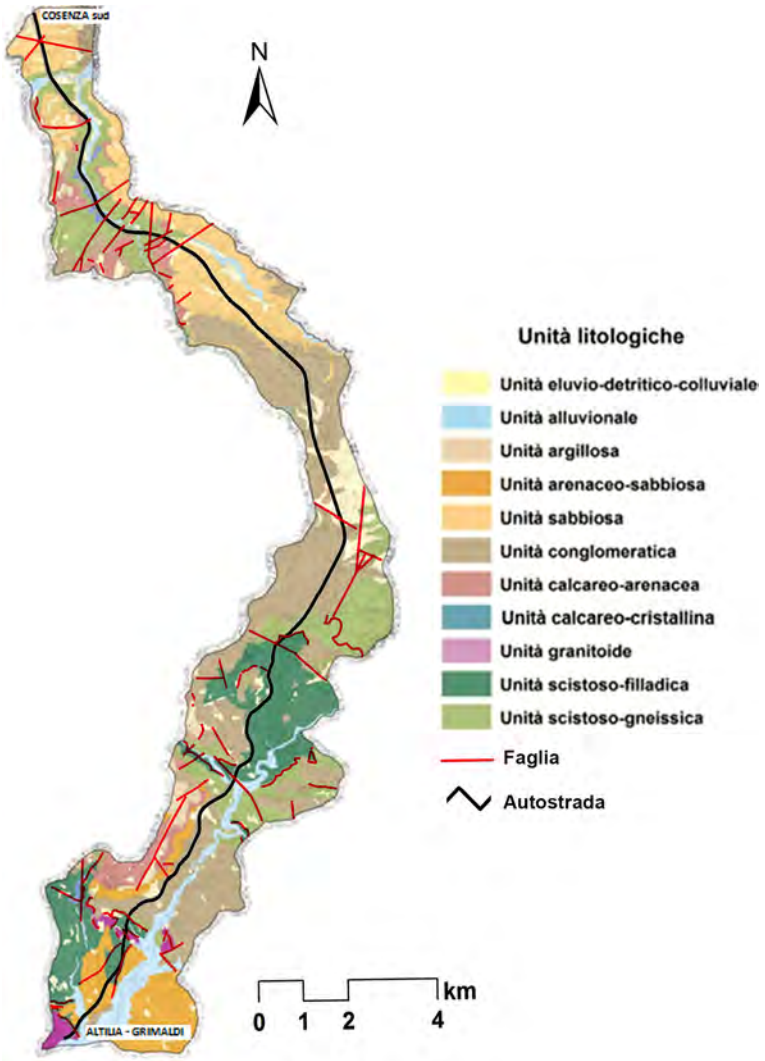

Fig. 2. Carta geolitologica dell'area di studio.

Il controllo tettonico dell'area è testimoniato anche dalla presenza di valli asimmetriche che seguono i sistemi di faglia orientati prevalentemente N-S e NO-SE. Lungo la media Valle del Savuto, le faglie principali sono rappresentate dal sistema N30°-N40°.

Nelle aree dove affiorano le rocce cristallino-metamorfiche (Fig. 2) i versanti sono molto acclivi e i corsi d'acqua risultano incassati in valli strette. In corrispondenza delle unità arenacee e conglomeratiche si osservano versanti con forme aspre,

caratterizzate da strette creste e da impluvi con profonde incisioni dalla tipica forma a «V». Dove affiorano le litologie più erodibili e più propense all'instabilità geomorfologica il paesaggio è caratterizzato da pianori, rilievi con versanti poco acclivi e valli più svasate.

La zona centrale dell'area di studio (Piano Lago), dove affiorano essenzialmente conglomerati e sabbie pleistoceniche (Fig. 2), è dominata da superfici pianeggianti di origine deposizionale, profondamente dissecate dai corsi d'acqua.

Il reticolo idrografico dell'area è rappresentato per gran parte dal sistema del Fiume Savuto e, nella parte posta più a nord, da porzioni del sistema drenante del Torrente Iassa, affluente di sinistra del Fiume Crati. Le valli dei corsi d'acqua principali, sono sede di depositi alluvionali, talvolta anche terrazzati, e di conoidi alluvionali e detritiche formatesi allo sbocco dei corsi tributari.

In generale il reticolo idrografico presenta un pattern sub-dendritico che assume tuttavia, in alcuni tratti, un andamento rettilineo e/o ortoclinale a causa del controllo esercitato dalle strutture tettoniche. Inoltre l'attività tettonica ha determinato un approfondimento del reticolo idrografico, come è testimoniato dall'incisione dei depositi alluvionali anche lungo le aste di ordine minore dove sono diffuse scarpate di erosione la cui altezza, in alcuni casi, supera i cinque metri.

Le precipitazioni medie annue sono comprese tra 900 e 1100 mm, concentrate essenzialmente nei mesi che vanno da novembre a marzo; la temperatura media si attesta intorno ai 16 °C (Conforti *et al.*, 2016).

3. Materiale e metodi

Il lavoro si è articolato in diverse fasi che hanno innanzitutto previsto l'acquisizione dei dati necessari per la valutazione della suscettibilità di frana. In questa prospettiva, dopo un'approfondita ricerca bibliografica volta al reperimento di studi geologici e geomorfologici pregressi, è stato eseguito il rilevamento geomorfologico dell'area di studio mediante foto-interpretazione multi-temporale (utilizzando foto aeree relative agli anni 1954, 1991 e ortofoto del 2006) integrata da rilievi in campo che hanno portato alla stesura di una carta inventario dei fenomeni franosi in scala 1:10.000. In aggiunta, è stata effettuata una selezione dei principali fattori geoambientali (litologia, uso del suolo, pendenze dei versanti, etc.) che concorrono al controllo di questi fenomeni.

I dati raccolti sono stati organizzati ed analizzati in ambiente GIS in modo da ottenere livelli informativi georeferenziati, sia per l'inventario delle frane che per i fattori predisponenti la franosità.

La fase successiva del lavoro è consistita nell'analisi della suscettibilità di frana, mediante l'applicazione del metodo statistico denominato «analisi condizionale» (Carrara *et al.*, 1995; Clerici *et al.*, 2002), implementato in un sistema GIS.

3.1. *Inventario dei fenomeni franosi*

I movimenti gravitativi sono ampiamente diffusi nell'area di studio e condizionano, oltre all'assetto morfologico generale dei versanti, anche la morfologia e la dinamica della rete idrografica. I rilievi geomorfologici hanno evidenziato che molte frane hanno coinvolto nel tempo insediamenti urbani e/o infrastrutture, provocando ingenti danni e situazioni di rischio elevato (Fig. 3). Nell'inverno 2009, a seguito di precipitazioni intense e prolungate, lungo il tronco autostradale si sono innescate numerose frane che hanno causato notevoli disagi alla viabilità. I danni maggiori si sono verificati nei pressi di Altilia, dove una frana ha travolto un veicolo in transito, provocando la morte di due persone e ferendone altre tre.

L'analisi geomorfologica ha portato alla mappatura di 844 fenomeni franosi (Tab. 1 e Fig. 3), che si manifestano con intensità, meccanismi ed effetti diversi a seconda delle caratteristiche geologico-strutturali, litotecniche, topografiche e idrologiche dei versanti interessati. Per ogni frana sono stato definiti, oltre ai limiti areali, la tipologia e lo stato di attività secondo la classificazione proposta da Cruden & Varnes (1996). Le frane rilevate si sviluppano prevalentemente per lunghezze comprese tra poche decine di metri fino a oltre i 650 metri. La superficie media delle frane è di circa 13.312 m², con valore minimo di 847 m² e massimo di 309.919 m².

Superficie area di studio (km²)	Numero di frane cartografate	Superficie totale in frana (km²)	Densità di frana (n. frane km⁻²)	Indice di franosità (%)
56,7	844	11,2	14,9	19,8

Tab. 1. Sintesi sulla franosità nell'area studiata.

In base al tipo di movimento le frane sono state distinte in scorrimenti (92 %), colamenti (1%), crolli (1%) e complesse per scorrimento-colata (6%). Lo stato di attività delle frane è stato dedotto dalle osservazioni fatte in campagna e dall'analisi multi-temporale delle foto aeree. Da quest'analisi risulta che il 29% delle frane rilevate risulta attivo, mentre il 71 % è considerato in uno stato di quiescenza. Per tutti i fenomeni gravitativi individuati sono stati distinti sia le zone di alimentazione (ZA) che le zone di accumulo. Per l'analisi di suscettibilità sono state considerate solo le ZA, in quanto rappresentative delle zone di innesco delle frane (Süzen & Doyuran, 2004; Conforti *et al.*, 2012). Inoltre, le ZA sono state suddivise in due gruppi, adottando una suddivisione random. Un gruppo (*training set*), rappresentato dal 70% del totale, è stato utilizzato per calibrare il modello statistico utilizzato per la stima della suscettibilità, mentre il secondo gruppo (*testing set*) è stato usato per valutare la capacità previsionale del modello (Chung & Fabbri, 2003).

3.2. *Fattori predisponenti*

La distribuzione spaziale dei fattori predisponenti la franosità e la loro parametrizzazione sono alla base della valutazione della suscettibilità di frana. La loro

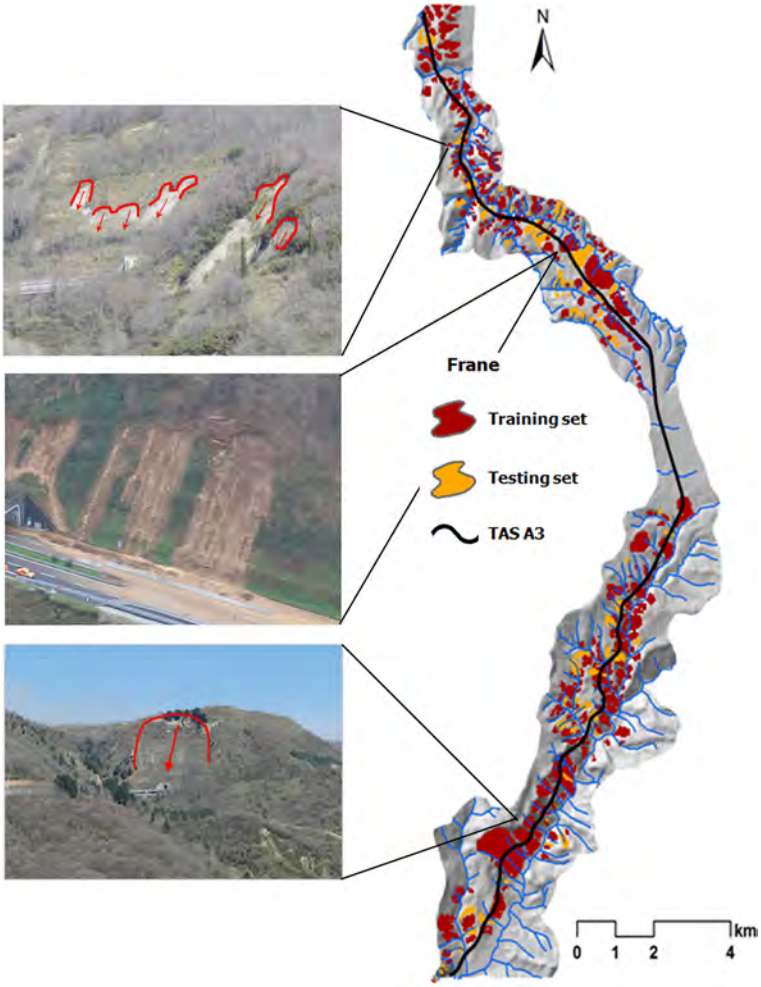

Fig. 3. Carta inventario della franosità dell'area di studio.

scelta è generalmente dettata dalla scala d'indagine, dalle caratteristiche dell'area di studio e dal tipo di frane studiate (Glade *et al.*, 2005).

Considerando i principali lavori a livello internazionale (Van Westen, 1997; Aleotti & Chowdhury, 1999; Rautela & Lakhera, 2000; Çevik & Topal, 2003; Süzen & Doyuran, 2004; Ermini *et al.*, 2005; Lee, 2005; Saha *et al.*, 2005; Yalcin, 2008; Conforti *et al.*, 2012; Conforti *et al.*, 2014a), la scelta dei fattori predisponenti da utilizzare nell'analisi di suscettibilità è stata svolta selezionando quelli che hanno fornito dati significativi una volta messi in relazione con la distribuzione delle frane: la litologia, l'uso del suolo, le faglie e quattro parametri topografici quali la pendenza,

l'esposizione, la curvatura planare dei versanti e lo *Stream Power Index* - SPI (Moore *et al.*, 1991). I fattori topografici sono stati estratti in maniera automatica da un modello digitale del terreno (DTM) con celle di 10 m di lato, realizzato a partire dalle curve di livello e dei punti quotati della cartografia topografica a scala 1:10.000.

3.2.1. *Litologia*

La litologia è uno dei principali fattori predisponenti la franosità, in quanto la natura e le caratteristiche geomeccaniche dei materiali geologici influenzano notevolmente l'instabilità dei versanti (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996; Yalcin, 2008; Conforti *et al.*, 2012). Integrando i dati della carta geologica della Calabria alla scala 1:25.000 con quelli ricavati dalla foto-interpretazione e dai rilevamenti di campagna sono state individuate, come accennato i precedenza, 11 unità litologiche omogenee dal punto di vista del comportamento geomeccanico, prendendo in considerazione, oltre alla loro composizione mineralogico-petrografica, anche il loro grado di fratturazione e alterazione. (Fig. 2).

3.2.2. *Distanza dalle faglie*

Le strutture tettoniche sono considerate un importante fattore che predispone un versante a franare sia per la forte energia del rilievo, che in molti casi creano, sia per lo stato di fratturazione e successiva alterazione che producono sulle rocce coinvolte (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996; Parise *et al*, 1997; Gupta, 2005; Conforti *et al.*, 2014a; Tansi *et al.*, 2016). Le fasce di fratturazione rappresentano spesso la sede preferenziale d'infiltrazione delle acque meteoriche in profondità che, favorendo i processi d'alterazione, predispongono i litotipi al dissesto riducendone la resistenza al taglio.

I principali lineamenti tettonici dell'area di studio sono stati ricavati dalla carta geologica della Calabria a scala 1:25.000 e integrati dal rilevamento di terreno e dall'analisi delle foto aeree. Per valutare l'influenza delle faglie sulla distribuzione dei movimenti franosi, sono stati creati 3 *buffer* (zone di rispetto, di diversa ampiezza) per ogni faglia, e all'interno di ogni *buffer* è stata valutata l'incidenza della franosità (Conforti *et al.*, 2011, 2012).

3.2.3. *Uso del suolo*

L'uso del suolo e, in particolare, la sua copertura vegetale esercitano una notevole influenza sulla stabilità dei versanti. In generale la presenza di una folta copertura arborea è favorevole alla stabilità perché attenua l'azione erosiva delle acque dilavanti, se si considerano frane la cui superficie di scorrimento non è più profonda degli apparati radicali; può, invece, causare instabilità se la stessa è più profonda rispetto alle radici degli alberi (Anbalagan, 1992; Pachauri & Pant, 1992; Nagarajan *et al.*, 2000). Infatti, se l'infiltrazione d'acqua è talmente elevata da causare un cospi-

cuo aumento dei livelli di falda, si ha un incremento delle pressioni neutre e una diminuzione delle resistenze al taglio, rendendo così instabile il versante.

Un terreno denudato e/o con scarsa vegetazione, al contrario, è più soggetto alla degradazione e all'erosione da parte degli agenti atmosferici e pertanto più suscettibile all'innesco di frane. In questo studio la carta dell'uso del suolo è stata realizzata mediante l'interpretazione di ortofoto a colori del 2006 e rilevamenti di terreno: sono state individuate quattro classi: zone agricole, zone boscate, zone con vegetazione erbacea e/o arbustiva e zone urbanizzate.

3.2.4. *Pendenza dei versanti*

L'acclività è uno dei fattori predisponenti più largamente utilizzato in letteratura per la valutazione della suscettibilità di frana (Anbalagan, 1992; Pachauri *et al.*, 1998; Clerici *et al.*, 2002; Saha *et al.*, 2002; Çevik & Topal 2003; Lee *et al.*, 2004; Lee, 2005; Yalcin, 2008; Conforti *et al.*, 2012). In questo studio l'acclività dei versanti, estrapolata dal DTM, è stata suddivisa secondo i seguenti intervalli: 0° - 10°; 10°- 20°; 20°- 30°; 30°- 60°.

3.2.5. *Esposizione dei versanti*

L'esposizione dei versanti, cioè la direzione verso cui questi sono esposti rispetto al nord geografico, è considerata un fattore topografico molto importante per il controllo dei processi di erosione e per l'innesco di frane (Çevik & Topal 2003; Yalcin, 2008; Rago *et al.*, 2016). Influenzando il microclima attraverso l'angolo e la durata di incidenza dei raggi solari, essa può determinare condizioni chimiche e/o fisiche particolari, che favorendo l'alterazione delle rocce e la formazione di coperture e suoli, possono determinare condizioni di instabilità. La carta dell'esposizione dei versanti è stata suddivisa secondo i quattro punti cardinali.

3.2.6. *Curvatura planare dei versanti*

La curvatura planare, gioca un ruolo importante nella stabilità geomorfologica dei versanti perché controlla la divergenza o la convergenza del flusso idrico (Wilson & Gallant, 2000; Fernandes *et al.*, 2004; Vijith & Madhu, 2008). Essa è data dalla derivata seconda della curva generata dall'intersezione della superficie topografica con il piano verticale tangente alle curve di livello, ed esprime la curvatura convessa o concava dei versanti con valori rispettivamente positivi e negativi. Per valori intorno allo zero la curvatura del versante è considerata piana.

Nell'area di studio, i versanti sono stati suddivisi in tre classi di curvatura: concavi, convessi e piani.

3.2.7. *Stream Power Index (SPI)*

Lo *Stream Power Index* (SPI) indica il potere erosivo del flusso idrico in ogni cella del DEM, ed è definito utilizzando l'espressione proposta da Moore *et al.*, (1991):

$$SPI = As \times \tan\sigma$$

dove As (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e rappresenta la pendenza espressa in gradi. Questo parametro è uno dei fattori principali che controllano i processi denudazione su un versante, influenzando direttamente l'erosione al suo piede e l'approfondimento erosivo dei corsi d'acqua. Nel presente lavoro i valori dello *Stream Power Index* sono stati suddivisi nelle cinque classi seguenti: <1; 1-3; 3-5; 5-10; >10.

3.3. *Metodologia per la valutazione della suscettibilità di frana*

Per la valutazione della suscettibilità di frana è stato utilizzato il metodo statistico di analisi condizionale (Clerici *et al.*, 2002; Falaschi *et al.*, 2007; Rago *et al.*, 2013) implementato in ambiente GIS; questo metodo si basa sulle «Unità di Condizioni Uniche» (UCU) che si ricavano dalla suddivisione del territorio in unità omogenee rispetto ai fattori predisponenti i fenomeni franosi, e rientra nella categoria dei metodi di analisi probabilistica condizionale (Carrara *et al.*, 1995; Clerici *et al.*, 2002). La scelta delle UCU comporta la suddivisione dei fattori predisponenti in livelli informativi (*layers*) tematici separati, articolati in un numero limitato di classi. Una volta definiti i livelli da utilizzare nell'analisi di suscettibilità, essi vengono trasformati in formato *raster*. L'intersezione di questi ultimi, tramite tecniche di analisi spaziale in ambiente GIS, porta alla realizzazione di una carta della distribuzione spaziale delle UCU (Fig. 4), alla quale è associata una tabella che contiene tutte le combinazioni tra i fattori predisponenti. Il numero delle UCU dipende dal numero delle classi che sono state individuate per ciascuno dei fattori predisponenti considerati.

Dalla sovrapposizione della mappa delle UCU con quella delle ZA del *training set* si ottiene la densità di frana in ciascuna UCU. Questa rappresenta la probabilità di propensione all'innesco di fenomeni franosi futuri, secondo quanto enunciato nel teorema di Bayes (Morgan, 1968) ed è espressa dalla formula:

$$(P(f \mid UCU) = \text{area ZA/area UCU})$$

dove P(f | UCU) rappresenta la probabilità (P) che si verifichi una frana (f) in futuro, data una certa combinazione dei fattori predisponenti (UCU). A ciascuna UCU viene dunque assegnato un valore di suscettibilità di frana in funzione della densità di area in frana riscontrata. Tali valori sono stati successivamente riclassificati allo scopo di rappresentare la suscettibilità in quattro classi relative (bassa, moderata, alta e molto alta). Le classi sono state ottenute applicando l'algoritmo dei *natural breaks* (Jenks, 1989) che permette di massimizzare la varianza fra le classi, minimizzando quella interna alle classi.

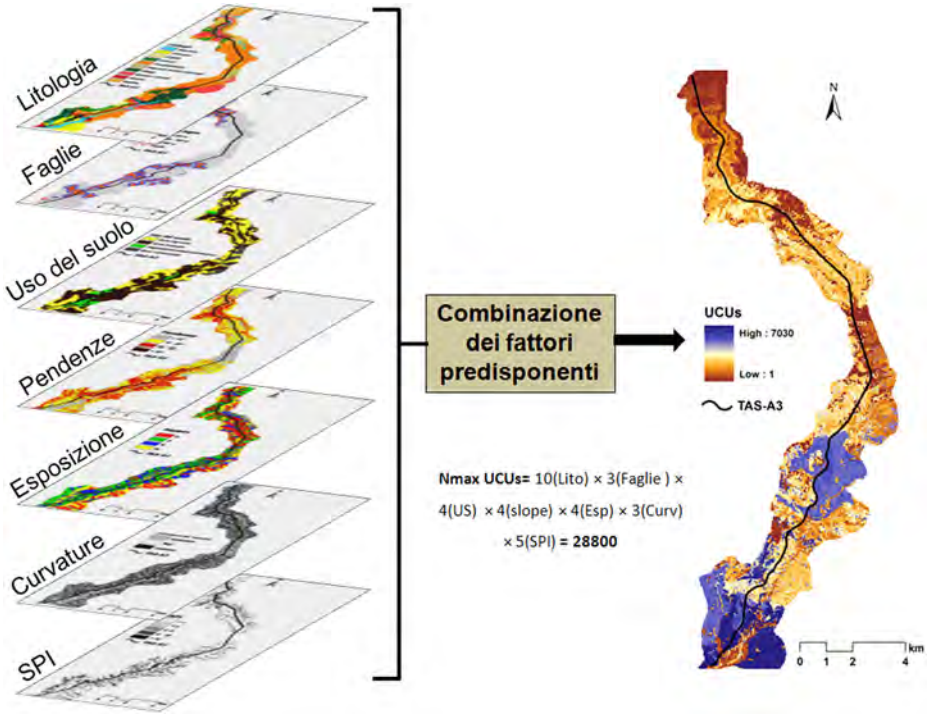

Fig. 4. Fattori predisponenti e schema metodologico per il calcolo delle UCU.

Una stima quantitativa dell'accuratezza della carta di suscettibilità redatta e conseguentemente della capacità previsionale del modello utilizzato, è stata fornita dalla realizzazione e dall'analisi di due curve: la *success rate* e la *prediction rate* (Chung & Fabbri, 2003; Remondo *et al.*, 2003). La curva *success-rate* è ottenuta riportando sull'asse delle ascisse di un grafico binario la percentuale cumulativa dell'area ricadente in ogni classe di suscettibilità, a partire da quella con i valori più elevati e, sull'asse delle ordinate, la percentuale cumulativa delle ZA del *training set* che ricadono nelle rispettive classi di suscettibilità. Questa curva definisce la capacità del metodo utilizzato nel classificare correttamente le ZA impiegate nell'analisi di suscettibilità e permette di valutare la bontà (*goodness of fit*) del modello predittivo (Chung & Fabbri, 2003). La forma della curva fornisce informazioni riguardo al grado di successo del modello; infatti maggiore è l'area sottesa dalla curva («*Area Under Curve*», AUC) maggiore risulterà il rendimento del modello. Per un modello ideale, la curva dovrebbe inizialmente discostarsi rapidamente dall'asse delle ascisse per poi crescere lentamente, approssimando il valore massimo.

La curva *prediction rate*, invece, è ottenuta seguendo la stessa procedura con la differenza che sull'asse delle ordinate si plottano le percentuali cumulate delle ZA del *testing set* (non utilizzate nell'analisi) che ricadono nelle rispettive classi di suscet-

tibilità. Questa curva esprime il grado di correlazione fra le carta di suscettibilità e la distribuzione spaziale delle ZA del *testing set*, che possono essere considerate come l'instabilità gravitativa «futura» (Chung & Fabbri, 2003; Conforti *et al.*, 2012).

Una tendenza diagonale della curva implica una predizione totalmente casuale (Conforti *et al.*, 2011). Pertanto, più la curva si allontana dalla diagonale e più è ripida nella parte iniziale tanto maggiore sarà la capacità predittiva del modello (Chung & Fabbri, 2003; Remondo *et al.*, 2003). Inoltre calcolando l'AUC è possibile quantificare la capacità di predizione del modello.

4. Risultati

Come descritto in precedenza, l'applicazione dell'analisi statistica di tipo condizionale necessita la selezione di un certo numero di fattori predisponenti la franosità che si presume siano in qualche modo legati all'instabilità geomorfologica del versante. I fattori predisponenti scelti (litologia, faglie, uso del suolo, pendenza dei versanti, esposizione dei versanti, curvatura dei versanti e SPI), opportunamente suddivisi in classi, sono stati organizzati ciascuno in un livello informativo a se stante. Successivamente, per ciascuna carta tematica relativa ai fattori predisponenti, è stata effettuata un'operazione di sovrapposizione in ambiente GIS con la carta inventario dei fenomeni franosi in modo da calcolare l'indice di franosità per ciascuna classe (rapporto percentuale tra l'area in frana in una classe e l'area della classe stessa). In questo modo è stato possibile giungere ad una valutazione preliminare dell'importanza relativa di ciascun fattore e classe riguardo alla distribuzione dei fenomeni franosi.

La Tabella 2 riporta l'elenco dei fattori prescelti, la loro suddivisione in classi e, per ciascuna di queste, il valore corrispondente di indice di franosità.

Dal punto di vista litologico, le unità risultate più instabili sono la scistoso filladica, la scistoso gneissica, la sabbiosa e la detritico colluviale; tutte queste presentano un indice di franosità superiore al 40% (Tab. 2). In particolare, nelle unità cristallino-metamorfiche l'alto indice di franosità è legato all'elevato stato di fratturazione e alterazione di queste rocce, oltreché, in molti casi, all'elevata acclività dei versanti che influisce in modo diretto sui parametri di resistenza al taglio delle rocce. Indici di frana piuttosto alti si riscontrano anche sui versanti con morfologia concava esposti ad est e sud. Ancora, alti valori dell'indice di franosità si sono ottenuti lungo i fianchi delle valli strette e profondamente incise, caratterizzate da elevati valori del parametro SPI.

Dalla combinazione spaziale dei sette fattori predisponenti, sono state ottenute 7030 UCU (Fig. 4), un numero molto inferiore rispetto al numero totale delle 28.800 possibili combinazioni; tale circostanza conferma la mutua dipendenza tra i fattori predisponenti.

Al fine di calcolare il valore di densità di frana per ciascuna delle combinazioni rappresentate dal *layer* delle UCU, è stata effettuata l'intersezione di quest'ultimo con il *layer* delle ZA del *training set*. In questo modo ad ogni UCU è stato associato

Fattori predisponenti	Classe dei fattori	Indice di franosità (%)
Litologia	Unità alluvionale Unità detritico-colluviale Unità argillosa Unità arenaceo-sabbiosa Unità sabbiosa Unità conglomeratica Unità calcarea Unità granitoide Unità scistoso filladica Unità scistoso-gneissica	1,3 42,4 27,3 23,4 51,2 37,1 29,2 30,6 46,9 45,1
Distanza dalle faglie	< 100m 100 - 300m > 300m	22,7 20,1 18,8
Uso del suolo	Zone agricole Zone boscate Zone a vegetazione erbacea / arbustiva Zone urbanizzate	18,4 19,3 23,3 16,4
Pendenza dei versanti	0-10° 10 - 20° 30 - 30° 30 - 60°	6,5 21,4 28,3 36,5
Esposizione dei versanti	N (315-0-45°) E (45-135°) S (135 – 225°) W (225 – 315°)	17,4 25,1 21,9 12,2
Curvatura dei versanti	Concave (<-0,001) Flat (-0,001 - 0,001) Convex (>0,001)	24,8 16,2 15,1
SPI	< 1 1 – 3 3 – 5 5 – 10 > 10	14,5 29,3 33,4 32,2 29,6

Tab. 2. Indice di franosità per ciascuna classe di ogni fattore predisponente.

un valore della suscettibilità di frana. Tra le UCU con i valori più alti di suscettibilità troviamo quelle aree caratterizzate da litologia scistoso gneissica con un utilizzo del suolo di tipo agricolo, inclinazione dei versanti compresa tra i 20 e i 30°, esposizione a est, curvatura concava dei versanti e SPI compreso tra 5 e 10. In Fig. 5° viene riportata la carta della suscettibilità di frana, nella quale i valori di suscettibilità sono stati riclassificati in quattro classi: bassa, moderata, alta e molto alta.

Dall'analisi dei dati ottenuti è emerso che il 33% dell'area investigata ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta (Fig. 5b). Inoltre, appare significativo evidenziare che dall'intersezione fra il tratto di autostrada studiato con la carta di

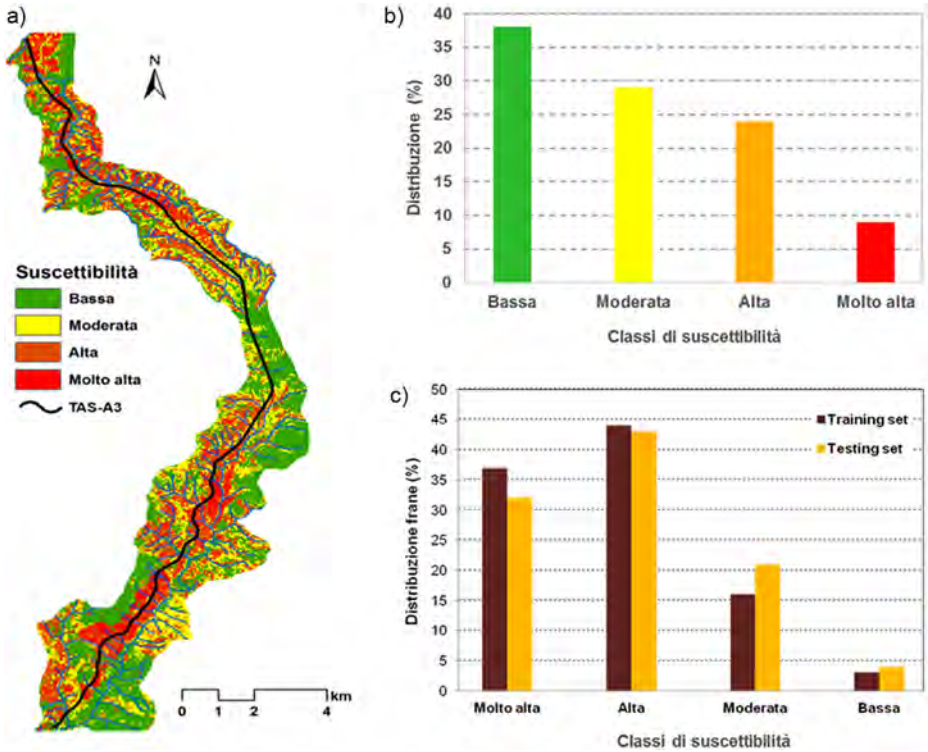

Fig. 5. a) Carta della suscettibilità di frana; b) distribuzione in percentuale delle classi di suscettibilità; c) distribuzione in percentuale delle zone di alimentazione (ZA) delle frane del training set e del *testing set* nelle diverse classi di suscettibilità.

suscettibilità è emerso che il 37% (10,4 km circa) dell'autostrada attraversa aree con suscettibilità da alta a molto alta.

Allo scopo di stimare l'accuratezza delle carte di suscettibilità è stato a queste sovrapposto l'inventario delle ZA. Da quest'operazione è emerso che l'82% delle ZA del *training set* e il 75% delle ZA del *testing set* sono correttamente classificate dal modello, perché ricadono nelle aree con suscettibilità alta e molto alta, mentre meno del 5% di entrambe le ZA ricade nelle zone con bassa suscettibilità (Fig. 5c). Inoltre, la curva *success rate* (Fig. 6), che permette di valutare la bontà del modello e dei dati utilizzati, risulta generalmente ripida nella parte iniziale per poi crescere in maniera abbastanza regolare con AUC pari a 0,82.

La curva *prediction rate* (Fig. 6), che esprime il grado di relazione tra le classi di suscettibilità e le ZA del *testing set*, presenta pressappoco lo stesso andamento con un'area sottesa dalla curva leggermente inferiore (AUC pari a 0,78). Pertanto, la validazione del metodo di suscettibilità utilizzato conferma un'effettiva (non casuale) correlazione fra la carta di suscettibilità predetta e la distribuzione spaziale delle ZA del

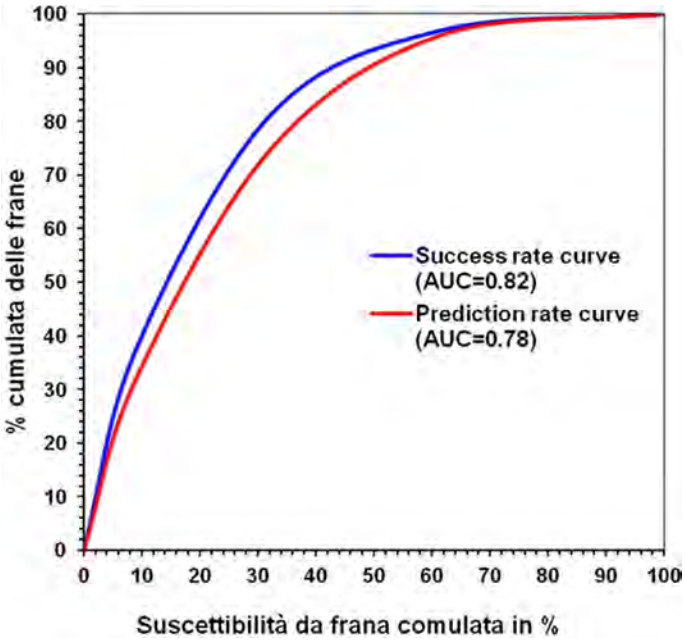

Fig. 6. Curva *success rate* e curva *prediction rate* (AUC = area sottesa dalla curva).

testing set. L'elevata capacità predittiva è confermata dal fatto che il 75% delle ZA ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta (Fig. 5c) e dal valore di AUC superiore a 0,70 (Swets, 1988). Si può affermare, dunque, che il metodo di analisi statistica «condizionale» e i fattori predisponenti scelti per l'analisi riescono a valutare in maniera soddisfacente la propensione da frana nell'area studiata.

La carta così ottenuta, quindi, può essere utilizzata per prevedere i futuri movimenti franosi che, in concomitanza con eventi di innesco quali piogge intense e/o prolungate o forti terremoti, avranno luogo con maggior probabilità nelle aree caratterizzate da suscettibilità alta e molto alta.

5. Discussione e conclusioni

Il quadro complessivo delineato da questa ricerca conferma in termini quantitativi l'incidenza e la rilevanza dei fenomeni franosi sui versanti percorsi dal tratto autostradale A3 studiato, compreso tra gli svincoli di Cosenza Sud ed Altilia (Calabria settentrionale).

Il marcato stato di dissesto riscontrato nell'area, responsabile di gravi danni sia in passato che in epoche recenti, appare legato alle peculiari caratteristiche litologico-strutturali del substrato e all'evoluzione tettonica che ha generato un'elevata energia di rilievo, una morfologia molto articolata e un notevole grado di frattura-

zione nei litotipi coinvolti nelle dislocazioni. A causa della ricorrenza di questi fenomeni si è ritenuto opportuno effettuare una valutazione e una rappresentazione cartografica della suscettibilità di frana, che rappresenta il primo livello di conoscenza necessario per l'identificazione delle relative condizioni di pericolosità e rischio. In tale prospettiva il metodo di analisi statistica condizionale, implementato in ambiente GIS, si è dimostrato molto efficace per individuare e mappare le aree con differente propensione a franare nelle diverse condizioni geologico-ambientali definite mediante la selezione dei fattori predisponenti.

Dalla carta di suscettibilità, suddivisa in quattro classi (molto alta, alta, moderata e bassa), è risultato che, rispettivamente, l'10 e il 27% del tracciato autostradale studiato ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta.

La procedura di validazione ha messo in evidenza l'elevato potere predittivo del metodo statistico utilizzato, in quanto il 75% dei versanti in cui ricadono le ZA utilizzate per la validazione (non utilizzate nella fase di calibrazione del modello - *testing set*), è stato classificato correttamente, ricadendo nelle aree con suscettibilità alta e molto alta.

In conclusione, la carta della suscettibilità ai fenomeni franosi, ottenuta utilizzando una metodologia il più possibile oggettiva, facilmente applicabile e aggiornabile, può essere ritenuta un elaborato molto utile che può essere validamente utilizzato come strumento conoscitivo in previsione di studi di maggior dettaglio, che mirano alla realizzazione dei modelli geologico-tecnici e alla messa in opera di reti di monitoraggio, su frane e/o su versanti ad elevata suscettibilità.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto PON01-01503, LEWIS (*Landslide Early Warning Integrated System*), Responsabile Scientifico Prof. Pasquale Versace.

BIBLIOGRAFIA

Aleotti P., R. Chowdhury, 1999. *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58, 21-44.

Anbalagan R., 1992. *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Engineering Geology, 32, 269-277.

Carrara A., M. Cardinali, F. Guzzetti, P. Reichenbach, 1995. *GIS-based techniques for mapping landslide hazard*. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (Carrara A., F. Guzzetti eds.), Kluwer, Dordrecht, pp. 135-175.

Çevik E., T. Topal, 2003. *GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey)*. Environmental Geology, 44, 949-962.

Chung C.F., A.G. Fabbri, 2003. *Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping*. Natural Hazards, 30, 451-472.

Clerici A., S. Perego, C. Tellini, P. Vescovi, 2002. *A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method*. Geomorphology, 48, 349-364.

Conforti M., V. Rago, F. Muto, P. Versace, 2016. *GIS-based statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility along the highway in Calabria (southern Italy)*. Rendiconti Online Società Geologica Italiana, 39, 155-158.

Conforti M., S. Pascale, G. Robustelli, F. Sdao, 2014a. *Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy)*. Catena, 113, 236-250.

Conforti M., F. Muto, V. Rago, S. Critelli, 2014b. *Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy)*. Journal of Maps, 10, 90-102.

Conforti M., G. Robustelli, F. Muto, S. Critelli, 2012. *Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vitravo river catchment (Calabria, south Italy)*. Natural Hazards, 61, 127-141.

Conforti M., S. Critelli, F. Muto, M. Carbone, 2011. *Valutazione della suscettibilità da frana mediante un'analisi statistica in ambiente GIS: applicazione al bacino del T. Incinerato (Calabria Meridionale)*. Engineering Hydro Enviromental Geology, 14, 37-47.

Cruden D.M., D.J. Varnes, 1996. *Landslide types and processes*. In: *Landslides, Investigation and Mitigation* (Turner A.K., R.L. Schuster eds.), Transportation Research Board Special Report 247, US National Research Council, Washington DC, pp. 36-75.

Ermini L., F., Catani, N., Casagli, 2005. *Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment*. Geomorphology, 66, 327-343.

Falaschi F., P.R. Federici, A. Puccinelli, M. Bottai, N. Casarosa, G. D'Amato Avanzi, F. Giacomelli, R. Giannecchini, A. Pochini, A. Ribolini, N. Salvati, S. Stano, C. Testi, 2007. *Metodologie di valutazione della suscettibilità di frana in alcune aree campione della Toscana settentrionale*. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali Memoria, Serie A, 112, 21-39.

Fernandes N.F., R.F. Guimaraes, R.A.T. Gomesa, B.C. Vieira, D.R. Montgomery, H. Greenberg, 2004. *Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modelling*. Catena, 55, 163-181.

Glade T., M. Anderson, M.J. Crozier (eds.), 2005. *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, New York, 824 pp.

Gullà G., L., Antronico, P., Iaquinta, O. Terranova, 2008. *Susceptibility and triggering scenarios at a regional scale for shallow landslides*. Geomorphology, 99, 39-58.

Gupta V., 2005. *The relationship between tectonic stresses, joint patterns and landslides in the higher Indian Himalaya*. Journal of Nepal Geological Society, 31, 51-58.

Jenks G.F., 1989. *Geographic logic in line generalization*. Cartographica, 26, 27-42.

Lanzafame G., L. Tortorici, 1981. *La tettonica recente del Fiume Crati (Calabria)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 4, 11-21.

Le Pera E., M. Sorriso-Valvo, 2000. *Weathering, erosion and sediment composition in a high-gradient river, Calabria, Italy*. Earth Surface Processes and Landforms, 25, 277-292.

Lee S., 2005. *Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data*. International Journal of Remote Sensing, 26, 1477-1491.

Lee S., J. Choi, K. Min, 2004. *Landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea*. International Journal of Remote Sensing, 25, 2037-2052.

Moore I.D., R.B. Grayson, A.R. Ladson, 1991. *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications*. Hydrological Processes, 5, 3-30.

Morgan B.W., 1968. *An Introduction to Bayesian Statistical Decision Process*. Prentice_Hall New York, 116 pp.

Nagarajan R., A. Roy, R. Vinod Kumar, A. Mukherjee, M.V. Khire, 2000. *Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58, 275–287.

Pachauri A.K., P.V. Gupta, R. Chander, 1998. *Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas*. Hydro-Enviromental Geology, 36, 325-334.

Pachauri A.K., M. Pant, 1992. *Landslide hazard mapping based on geological attributes*. Engineering Geology, 32, 81-100.

Parise M., M. Sorriso-Valvo, C. Tansi, 1997. *Mass movements related to tectonics in the Aspromonte massif (Southern Italy)*. Engineering Geology, 47, 89-106.

Rago V., M. Conforti, P. Caloiero, G. Iovine, O. Teranova, F. Muto, S. Pascale, 2016. *Problematiche di valutazione della suscettibilità da frana. L'esempio del bacino del torrente Turbolo (Calabria settentrionale)*. Geologi Marche, 57, 4-44.

Rago V., M. Conforti, F. Muto, S. Critelli, 2013. *Landslide susceptibility assessment in the Ferro Torrent (Calabria, south Italy) using GIS-based Conditional analysis method*. Rendiconti Online della Società Geologica Italiana, 2013, 24, 257-259.

Rautela P., R.C. Lakhera, 2000. *Landslide risk analysis between Giri and Ton Rivers in Himalaya (India)*. Applied Earth Observation and Geoinformation, 2, 153-160.

Remondo J., A. Gonzàlez-Dìez J.R. Dìazde Teran, A. Cendrero, A. Fabbri, C.F. Chung, 2003. *Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain*. Natural Hazards, 30, 437-449.

Saha A.K., R.P. Gupta, M.K. Arora, 2002. *GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas*. International Journal of Remote Sensing, 23, 57-369.

Saha A.K., R.P. Gupta, I. Sarkar, M.K. Arora, E. Csaplovics, 2005. *An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas*. Landslides, 2, 61-69.

Sorriso-Valvo M., C. Tansi, 1996. *Relazioni tra frane, forme del rilievo e strutture tettoniche nella media Valle del Fiume Crati (Calabria)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 19, 107-117.

Süzen M.L., V. Doyuran, 2004. *Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey*. Engineering Geology, 71, 303-32.

Swets J.A., 1988. *Measuring the accuracy of diagnostic systems*. Science, 204, 1285-1293.

Tansi C., M. Folino Gallo, F. Muto, P. Perrotta, L. Russo, S. Critelli, 2016. *Seismotectonics and landslides of the Crati Graben (Calabrian Arc, Southern Italy)*. Journal of Maps, DOI: 10.1080/17445647.2016.1223760.

Tansi C., F. Muto, S. Critelli, G. Iovine, 2007. *Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (Southern Italy)*. Journal of Geodynamics, 43, 393-414.

Tansi C., M. Sorriso-Valvo, R. Greco, 2000. *Relationships between joint separation and faulting: an initial numerical appraisal*. Engineering Geology, 52, 225-230.

Tortorici L. 1981. *Analisi delle deformazioni fragili dei sedimenti postorogeni della Calabria settentrionale*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 100, 291-308.

Van Dijk J.P., M. Bello, G.P. Brancaleoni, G. Cantarella, V. Costa, A. Frixa, F. Golfetto, S. Merlini, M. Riva, S. Torricelli, C. Toscano, A. Zerilli, 2000. *A regional structural model for the northern sector of the Calabrian Arc (southern Italy)*. Tectonophysics, 324, 267-320.

Van Westen C.J. 1997. *Statistical Landslide Hazard Analysis, ILWIS 2.1 for Windows Application Guide*. ITC publication, Enschede, The Netherlands, pp. 73-84.

Vijith, H., G. Madhu, 2008. *Estimating potential landslide sites of an upland sub-watershed in Western Ghat's of Kerala (India) through frequency ratio and GIS*. Environmental Geology, 55, 1397-1405.

Wilson J.P., J.C. Gallant, 2000. *Terrain Analysis Principles and Applications*. Wiley, Toronto Canada, 479 pp.

Yalcin A., 2008. *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparison of results and confirmations*. Catena, 2, 1-12.