Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A, 116 (2011)
pagg. 55-66, figg. 4; *doi: 10.2424/ASTSN.M.2011.06*

M. Capitani (*)

OSSERVAZIONI SULLA CAPACITÀ PREDITTIVA DELL'ANALISI CONDIZIONALE APPLICATA AGLI ORLI DELLE SCARPATE PRINCIPALI (OSP) NELLO STUDIO DELLA SUSCETTIVITÀ DA FRANA: IL CASO DEL BACINO DEL T. ROGLIO (TOSCANA)

Riassunto - È stata effettuata un'analisi della capacità predittiva del Metodo Condizionale applicato agli Orli delle Scarpate Principali (OSP) nella definizione della suscettività di frana per il bacino del T. Roglio (Italia). Una campagna di rilevamento geomorfologico di dettaglio, associata ad un'analisi delle foto aeree, ha permesso la definizione di due differenti inventari delle frane suddivisi su scala temporale. Le frane associate ad un periodo precedente al 1975 sono state utilizzate per creare i modelli di suscettività, mentre quelle relative al periodo successivo sono state usate per analizzare la capacità predittiva dei differenti modelli. Sei mappe di fattori, considerati sia predisponenti lo sviluppo delle frane che invarianti nel tempo, sono state realizzate in ambiente GIS. Successivamente, tutti i fattori predisponenti presi in considerazione sono stati relazionati con gli inventari dei fenomeni franosi utilizzando un programma creato sempre in ambiente GIS. Questa procedura è stata applicata separatamente per ogni tipologia di frana e per ogni differente combinazione dei sei fattori considerati. Il confronto tra la distribuzione delle frane post-1975 e quella derivata dai numerosi modelli creati, ha permesso la definizione della capacità predittiva per ogni singolo modello.

Parole chiave - Suscettività da frana, Metodo Condizionale, Orlo delle Scarpate Principali (OSP), capacità predittiva, bacino del T. Roglio (Toscana).

Abstract - *Predictive power of the MSUE-Conditional Method in the landslide susceptibility zonation: the case study of the Roglio Basin (Italy).* An attempt to analyze the Main Scarp Upper Edge (MSUE)-Conditional-Method predictive power was made in Landslide Susceptibility zonation of the Roglio Basin (Italy). A detailed geomorphological mapping, aided by aerial photographs analysis, enabled us to build two-timed landslide inventories. The landslides related to a period before 1975 were used to create the models, while those related to a period after 1975 were used to validate the model predictive power. For the correct mapping of the MSUE into a ArcGIS (ESRI) the landslides occurred before 2006 have been mapped directly over the orthophotos related to 2006 (at the scale 1:10,000), with the aid of the aerial photographs and field inspection. The orthophotos have been successively scanned, imported into ArcGIS, rectified, georeferenced, assembled and digitized into a feature-class. For the landslides occurred after 2006, a GPS (Garmin 60CSx) field survey was necessary to delimit their MSUE. Also old landslides have been introduced into the statistical analysis. This fact has made necessary to consider only time-invariant (or quasi-static) environmental factors that can be supposed to change over geomorphological time scale, as geological or morphometric characteristics. So, six time-invariant factors maps were also developed in a GIS environment. Lastly, the landslide inventory maps and the six landslide-related factor maps were processed using a Model-Builder in a GIS environment. The procedure was made separately to each landslide typology and for each different combination of the six factors. The comparison between the distribution of the landslides after 1975 and the predicted distribution derived from susceptibility models established the predictive power of each model.

Key words - Landslide Susceptibility, MSUE-Conditional-Method, predictive power, T. Roglio Basin (Tuscany, Italy).

Introduzione

Al fine di definire la suscettività di frana sono stati applicati numerosi metodi di indagine statistica (Guzzetti *et al.*, 1999; Chung & Fabbri, 1999; van Westen *et al.*, 2008). Il concetto fondamentale che comunque caratterizza tutti i metodi utilizzati è rappresentato dal fatto che la distribuzione spaziale delle frane occorse nel passato è la chiave per comprendere quella che caratterizzerà l'occorrenza delle frane nel futuro (Carrara *et al.*, 1995). In altre parole, la probabilità di occorrenza spaziale di un evento franoso in aree libere da frane viene definita dallo studio delle similitudine, nelle condizioni geo-ambientali, tra queste e quelle dove le frane si sono già esplicate. Pertanto, per ogni differente metodo di analisi statistico la procedura di lavoro, che è alla base per una corretta zonazione della suscettività, consiste in (Carrara *et al.*, 1995; Rossi *et al.*, 2010):

- la conoscenza della distribuzione delle frane del passato e la loro corretta e completa mappatura;
- la mappatura di una serie di fattori che sono ritenuti essere responsabili della distribuzione non casuale delle frane rilevate;
- la definizione del rapporto statistico tra distribuzione dei fattori predisponenti e quella delle frane rilevate;
- l'assegnazione del grado di suscettività in base alle relazioni statistiche osservate nel modello validato.

L'analisi delle relazioni tra fattori predisponenti e frane necessita della definizione di un'unità di mappa (unità di osservazione statistica) sulla quale elaborare i dati osservati e determinare la zonazione spaziale della suscettività per il territorio indagato. L'unità di mappa costituisce la porzione della superficie terrestre che dovrebbe massimizzare l'omogeneità interna nei confronti di quei fattori ambientali considerati predisponenti il fenomeno frana, nonché massimizzare le differenze verso le unità adiacenti (Guzzetti *et al.*, 1999). Le

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Pisa, Italy.

Unità di Condizioni Uniche (UCU) rappresentano aree all'interno delle quali sussistono condizioni ambientali esclusive (Carrara *et al.* 1995).
Negli ultimi decenni molti ricercatori hanno elaborato carte della suscettività di frana utilizzando differenti metodi di analisi statistica applicati alle Unità di Condizioni Uniche (UCU) (Carrara *et al.*, 1995; Chung *et al.*, 1995; Guzzetti *et al.*, 1999; Irigaray *et al.*, 1999; Clerici *et al.*, 2002; Can *et al.*, 2005; Federici *et al.*, 2005, 2007; Falaschi *et al.*, 2008). Tuttavia, nessuno ha sottolineato il fatto che la scelta di rappresentare la variabile dipendente (che è definita con l'inventario dei fenomeni franosi) possa in realtà condurre alla realizzazione di modelli con una capacità predittiva mal definibile. Giacché la suscettività viene definita in base alle condizioni predisponenti che hanno favorito il verificarsi del fenomeno franoso, la variabile dipendente dovrebbe essere rappresentata all'interno dell'inventario delle frane come l'area dove queste si sono generate, cioè l'area di distacco (*detachment zone*) (Chung & Fabbri, 1999; 2008; Ayalew & Yamagishi, 2005; Nefeslioglu *et al.*, 2008; Conoscenti *et al.*, 2008). Se la variabile dipendente fosse invece comprensiva anche del corpo di frana, i fattori ambientali sarebbero relazionati con l'insorgere dell'evento franoso ed erroneamente considerati predisponenti (Clerici *et al.*, 2006, 2010; Magliuolo *et al.*, 2008). Generalmente però le aree di distacco non sono sempre ben visibili, in quanto in parte coperte dai rispettivi corpi di frana, e la loro completa definizione all'interno di un inventario dei fenomeni franosi è altamente soggettiva (Clerici *et al.*, 2010). Nella definizione dell'area di distacco, inoltre, non esiste la possibilità di determinare quanto la nostra rappresentazione differisca da quella reale. Questo dunque introduce errori non quantificabili nella rappresentazione della variabile dipendente, che a sua volta porta ad errori non quantificabili nella definizione della variabile indipendente, ovvero sia del tipo di unità di condizioni uniche coinvolte nella genesi delle frane che del loro grado di instabilità. Pertanto, la rappresentazione della variabile dipendente mediante la superficie di distacco rende incerti i risultati circa una validazione della capacità predittiva dei vari modelli statistici così creati. Infatti, la variabile dipendente viene sempre usata sia durante la fase di costruzione dei modelli che in quella relativa alla loro validazione (Chung & Fabbri, 2003; 2008; Guzzetti *et al.*, 2006; Guzzetti *et al.*, 2009; Frattini *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2010; Ghosh *et al.*, 2011; Melchiorre *et al.*, 2011). Fondamentalmente, se nel sistema viene considerata una non ben definita zona sorgente delle frane per correlare le UCU agli eventi di instabilità, il modello con la miglior capacità predittiva, scelto mediante il processo di validazione, potrebbe in realtà avere una bassa capacità predittiva nei confronti dell'esplicarsi delle frane future. Così, solo una ben definibile variabile dipendente dovrebbe essere usata nell'analisi statistica della suscettività da frana.
Tra i vari sistemi di rappresentazione del fenomeno franoso che possono ridurre il margine di soggettività e non introdurre errori non quantificabili, quello connesso con la definizione degli Orli delle Scarpate Principali (Clerici, 2002) è il solo che potrebbe essere adottato per l'analisi della suscettività da frana. Sebbene gli orli delle scarpate principali (OSP) delle frane siano completamente osservabili, in quanto esposti, la rappresentazione della variabile dipendente tramite l'uso delle OSP costituisce comunque un'approssimazione nell'analisi delle relazioni tra fattori predisponenti ed il fenomeno frana. L'approssimazione di fondo riguarda l'assunzione delle scarpate di frana come elemento morfologico strettamente rappresentativo dell'area d'innesco dei fenomeni franosi. Infatti, presa una singola frana non è pensabile, a priori, che le condizioni predisponenti in corrispondenza dell'area sorgente siano tutte riscontrabili anche in prossimità del relativo orlo di scarpata. L'uso degli OSP può comunque comportare una sensibile riduzione delle capacità predittive dei modelli creati rispetto a quelli derivanti dall'uso delle superfici di distacco, condizione, quest'ultima, che richiederebbe per aree estese sforzi economici troppo elevati. A differenza però di una definizione soggettiva delle aree di distacco come variabili dipendenti, la capacità predittiva dei modelli statistici creati con l'uso degli OSP, che non introducono errori non quantificabili, può essere determinata con accuratezza ed analizzata, portando così a poter valutarne l'applicabilità ai fini della zonazione della suscettività di frana.
L'applicabilità dei metodi statistici agli OSP è stata scarsamente studiata in passato ed in modo poco rigoroso. La capacità predittiva dei modelli realizzati è stata, infatti, analizzata o mediante l'uso di un dataset di validazione generato con suddivisione casuale delle frane rilevate o senza considerare le condizioni prefrana nella definizione delle relazioni tra fattori predisponenti e fenomeni franosi. La selezione casuale di un dataset di validazione da quello relativo alle frane può portare alla selezione sia del tipo che della quantità di UCU coinvolte nelle frane non rappresentative dell'immagine reale della suscettività da frana. Il campione statistico utilizzato per l'analisi della capacità predittiva di un modello previsionale deve essere considerato una parte di tutte le unità statistiche costituenti la popolazione, scelto in modo da dare un'immagine ridotta ma fedele delle caratteristiche della stessa (Buccianti *et al.*, 2003). I modelli previsionali dovrebbero essere creati quindi con l'utilizzo di un dataset di frane pertinente ad un periodo temporale antecedente a quello a cui appartengono le frane usate per i processi di valutazione delle relative capacità predittive (Chung & Fabbri, 1999, Guzzetti *et al.*, 2006; Irigaray *et al.*, 2007; van Westen *et al.*, 2008; Blahut *et al.*, 2010).
In base a queste considerazioni, si ritiene importante per questo studio cercare di valutare in modo rigoroso quale sia l'applicabilità degli OSP allo studio della suscettività di frana ovvero quanto il loro utilizzo possa portare a modelli di suscettività con una capacità predittiva accettabile. Tale fine sarà ricercato mediante l'uso dell'Analisi Condizionale, che tra i metodi statistici appare essere certamente uno dei migliori per la comprensione e la lettura da parte del personale non specializzato, analizzando la capacità predittiva del metodo applicato agli OSP, i relativi vantaggi ed i possibili limiti.

Area di studio

Il metodo in esame è stato applicato al bacino del T. Roglio, situato nella Toscana centrale (Fig. 1). L'area in questione ha un'estensione di circa 160 km^2 ed un'elevazione che varia da circa 20 m a circa 500 m sopra il livello medio marino, con un valore medio di 130,9 m (deviazione standard = 72,1 m). Il bacino appare allungato in direzione N-NW e mostra un carattere prevalentemente collinare con pendii mediamente poco acclivi. I valori di acclività più elevati si riscontrano prevalentemente nelle aree del bacino dove affiorano le facies delle formazioni plioceniche sia sabbioso-cementate sia argillose con caratteri di sovra-consolidazione.

Principali caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area di studio

Nel bacino del T. Roglio la fase compressionale appenninica ha originato un complesso di sovrascorrimenti tra formazioni appartenenti alle Liguridi ed alla Falda Toscana (Costantini *et al.*, 1998). In particolare, nei settori orientali del bacino affiorano formazioni liguridi appartenenti all'Unità Ofiolitifera di Montaione (Flysch di Montaione, Complesso di M. Carulli) che sono sovrascorse sopra a quelle della Falda Toscana non metamorfica. Quest'ultime a loro volta appaiono sovrascorse alle formazioni anagenitiche e scistoso-porfiriche che caratterizzano la serie permo-triassica toscana metamorfica e che affiorano in modo assai limitato. Le unità appartenenti al Dominio Ligure sono rappresentative sia di ambiente torbiditico-distale ed emipelagico sia della crosta oceanica che costituiva l'antico bacino Ligure-Piemontese e sono composte prevalentemente da formazioni caratterizzate dall'alternanza di argilliti ed arenarie fini e da argilliti intervallate a calcareniti fini.

Le deformazioni post collisionali sono strettamente correlabili alla tettonica di tipo distensivo che dal Miocene ha causato il collasso di gran parte della catena appenninica. La fase distensiva si è esplicata tramite sistemi di faglie normali, con direzione preva-

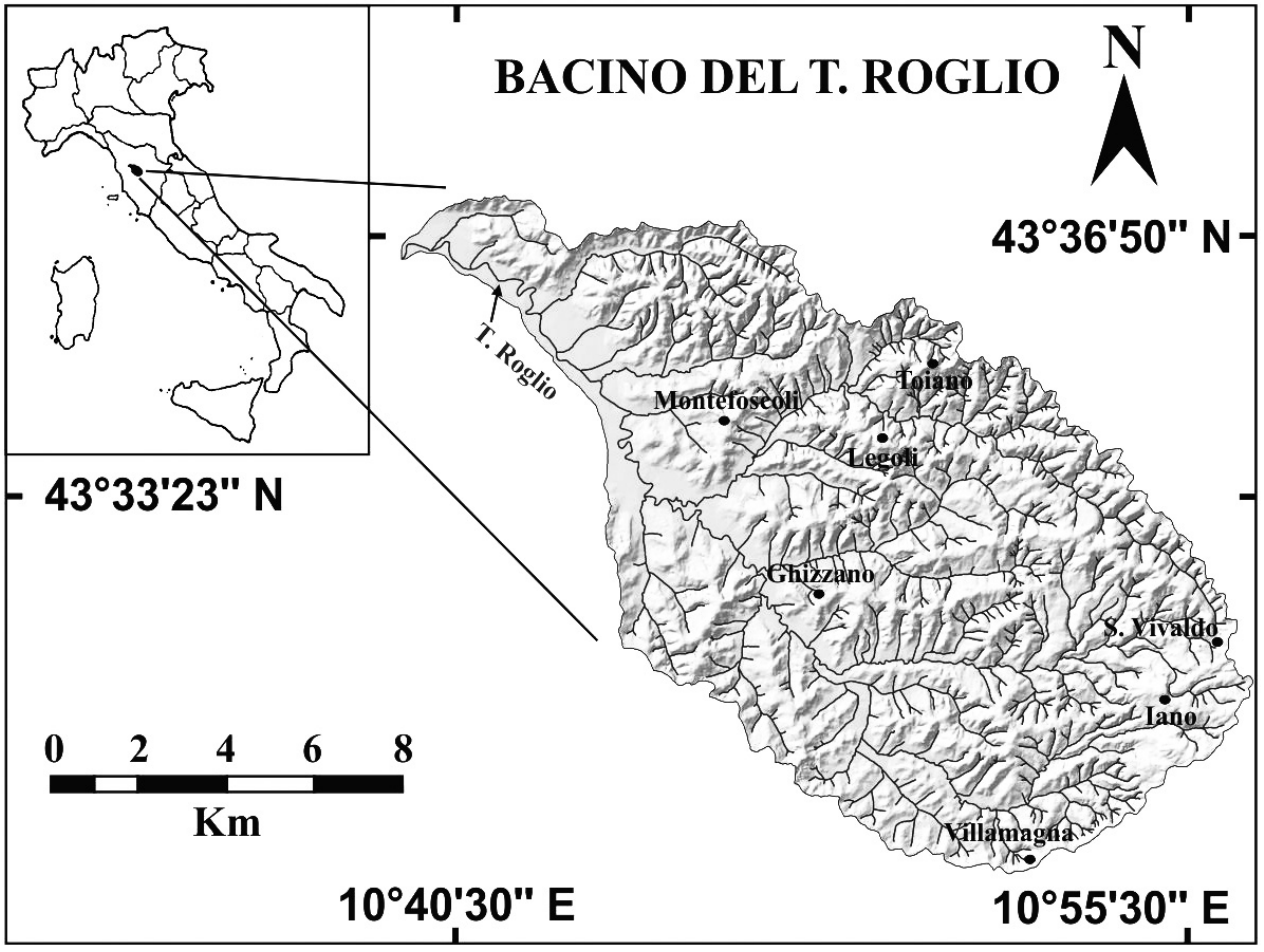


Fig. 1 - Inquadramento geografico del bacino del T. Roglio.

lentemente appenninica, che hanno guidato l'attuarsi di sollevamenti differenziali e l'origine di estesi bacini inter-montani (Trevisan, 1952; Federici & Rau, 1980; Puccinelli, 1987; D'Amato Avanzi & Puccinelli, 1989). La deposizione delle successioni neogeniche è stata fortemente controllata dai movimenti verticali correlabili a questa prolungata fase distensiva, che probabilmente si è protratta oltre il Pleistocene medio (Bossio *et al.*, 1993). I depositi neogenici presenti lungo gran parte del bacino sono sia di ambiente marino costiero che di piattaforma interna e sono caratterizzati da formazioni sabbiosio-argillose ed argillose.
La fase tettonica di tipo distensivo deve aver condizionato anche nell'Olocene l'evoluzione idrografica del bacino del T. Roglio. L'abbassamento del livello di base della rete idrografica è testimoniata dai numerosi terrazzi fluviali olocenici presenti a quote differenti lungo il bacino (Rapetti *et al.*, 2006). L'evoluzione recente del livello di base del T. Roglio, e dei suoi affluenti, appare l'elemento predisponente per lo sviluppo di numerosi fenomeni franosi collocati nei pressi dei corsi d'acqua, probabilmente per effetto dell'erosione esercitata dai torrenti alla base dei versanti. Gli effetti connessi con l'erosione laterale dei principali elementi idrografici è tutt'oggi un importante processo morfogenetico. La morfologia dell'area di studio appare fortemente condizionata dai numerosi fenomeni franosi appartenenti alle tipologie dello scorrimento rotazionale, del colamento e di scorrimento traslativo. L'azione di degradazione esplicata dalle acque meteoriche, in relazione con le tipologie più argillose dei depositi pliocenici, ha consentito inoltre la genesi di numerose aree calanchive, ad oggi solo parzialmente attive e soggette ad una dinamica dei versanti strettamente connessa con quella gravitativa (Battaglia *et al.*, 2011).

Il Metodo Condizionale applicato alle OSP

Il Metodo dell'Analisi Condizionale è basato sul Teorema di Bayes (Morgan, 1968) che afferma che la probabilità di occorrenza futura di un evento *E,* associato a specifiche condizioni al contorno, è determinata dal conteggio dello stesso tipo di evento che è avvenuto nel passato sotto le stesse condizioni al contorno (probabilità condizionata). In particolare, nel caso di analisi della suscettività di frana (SF) la probabilità condizionata di accadimento di un fenomeno franoso in una UCU (condizione al contorno) è assunta pari alla densità delle frane che nel passato si sono verificate in quella UCU (Carrara *et al.*, 1995).
Considerando il problema per l'uso delle superfici di distacco come rappresentazione della variabile dipendente, le frane in questo lavoro sono state identificate attraverso i rispettivi OSP (Clerici, 2002; Clerici *et al.*, 2006; 2010). Inoltre, è stato usato un *buffer* verso monte di 10 m per ogni OSP nel tentativo di considerare le condizioni (UCU) preesistenti la frana (Süzen & Doyuran 2004a; 2004b; Nefeslioglu *et al.*, 2008). Nel metodo applicato per la zonazione della suscettività di frana nel bacino del T. Roglio, la probabilità condizionata del fenomeno franoso per una data UCU è assunta, quindi, come il rapporto della somma delle aree di ogni UCU che cadono all'interno del *buffer* degli OSP e l'area totale della specifica UCU. Considerando il differente ordine di grandezza tra le due aree in gioco, la densità di frana così calcolata è stata espressa in m^2/km^2.

Inventario dei fenomeni franosi

La carta inventario delle frane utilizzata in questo studio è il risultato di un dettagliato rilevamento geologico e geomorfologico che si è protratto per circa due anni. Il rilevamento delle frane è stato eseguito al 2010 sulle carte topografiche della Regione Toscana alla scala 1:10.000. La fase di rilevamento è avvenuta con l'aiuto delle foto aeree relative al 1975, alla scala 1:13.000 (Volo EIRA). L'uso di foto aeree del 1975 è stato necessario al fine di suddividere le frane rilevate in due gruppi indipendenti. Le frane avvenute precedentemente il 1975 sono state usate per creare i modelli predittivi mentre quelle successive per validarne la capacità predittiva.
Seguendo la divisione proposta da Keefer (1984), sono state considerate solo le frane con superficie di scorrimento profonda (> 3 m), mentre non sono state considerate le frane superficiali e di dimensioni ridotte. Quest'ultime di fatto tendono ad essere cancellate nel tempo dai fenomeni di degradazione meteorica molto più rapidamente di quelle profonde, quindi un loro utilizzo nella realizzazione dei modelli, ma soprattutto nella loro validazione, avrebbe certamente condizionato la capacità predittiva degli stessi. Nel complesso le frane osservate occupano una superficie di circa 16,7 km^2, rappresentando il 10,4% dell'intera area di studio.
In accordo con Guzzetti *et al.* (1999), la carta della suscettività di frana dovrebbe essere costruita per ogni singola tipologia di frana. Per tale motivo, le frane rilevate sono state separate in differenti inventari in base alla prevalente tipologia di movimento. Poiché in questo studio vengono considerati gli OSP, le frane appartenenti alla tipologia complessa sono state classificate in base alla loro iniziale tipologia di movimento. Così, nell'area di studio le frane rilevate (4.137) sono state raggruppate in tre principali tipi: scorrimento traslativo (3.174), colamento (873) e scorrimento rotazionale (90). Tra queste, 233 traslative, 102 colamenti e 19 rotazionali sono avvenute successivamente al 1975. Per una corretta mappatura degli OSP, le frane occorse precedentemente al 1975 sono state cartografate direttamente sopra le ortofoto della Regione Toscana (ortofoto del 2006 alla scala 1:10.000) con l'aiuto delle foto aeree. I fenomeni franosi risalenti al periodo compreso tra il 1975 ed il 2006 sono stati anch'essi riportati sulle ortofoto. Le ortofoto sono state successivamente scannerizzate, importate in ArcGIS (ESRI), rettificate, georeferenziate, assemblate e digitalizzate in formati vettoriali. Per le 19 frane traslative, i 6 colamenti e le 2 rotazionali occorse successivamente al 2006 è stato necessario realizzare una campagna di rilevamento GPS (Garmin 60CSx; accuratezza ≤ 3 m, precisione ≤ 1m) per delimitare gli OSP, dove sono stati rilevati almeno 5 punti per ogni morfotipo. Tra questi, sono compresi i due punti di contatto tra la scarpata ed il

relativo corpo di frana. Tutti i punti GPS sono stati importati in ArcGIS e digitalizzati come livelli vettoriali di tipo lineare (*feature-class*).

Fattori predisponenti

Nell'analisi effettuata è possibile che siano stati introdotti anche fenomeni franosi molto antichi, dato che per le frane precedenti al 1975 non esistono vincoli cronologici. Questa incertezza ha reso indispensabile considerare nell'analisi statistica solo fattori ambientali invarianti nel tempo o comunque che possono essere considerati come quasi statici, come ad esempio la geologia e le caratteristiche morfometriche derivati dal DEM (Clerici *et al.*, 2010). Infatti, se nell'analisi venissero introdotti fattori variabili nel tempo, come l'uso del suolo, l'attività antropica e le condizioni climatiche, il ruolo giocato da tali fattori nella zonazione della suscettività potrebbe ingenerare interpretazioni errate (Atkinson & Massari, 1998). In particolare, per il bacino del T. Roglio è stato appurato che le variazioni nell'uso del suolo avvenute nell'ultimo cinquantennio sono state assolutamente non trascurabili (Mannucci *et al.*, 2008). Inoltre, applicando il metodo condizionale per la definizione della suscettività di frana, è necessario limitare il numero dei fattori che vengono introdotti nell'analisi al fine di limitare la presenza di piccole UCU con ridotta significatività statistica (Carrara *et al.*, 1995). Pertanto nel presente lavoro, sono stati considerati i fattori ambientali di seguito elencati: litologia, inclinazione dei versanti, esposizione dei versanti, distanza dagli elementi idrologici, distanza dagli elementi tettonici e distanza dalle scarpate di degradazione.

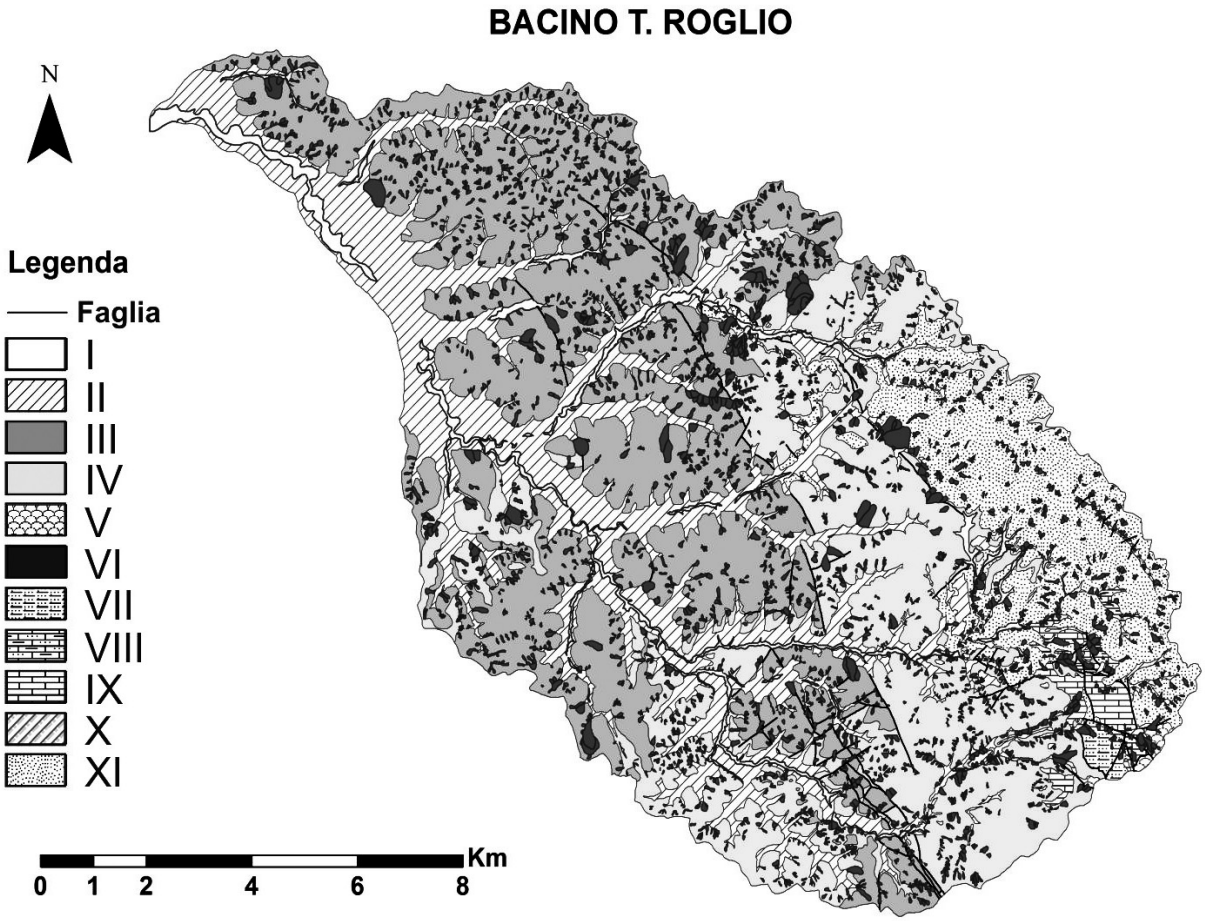
Litologia

La carta dei litotipi è il risultato di circa due anni di lavoro. Il rilevamento geologico ha permesso di osservare i rapporti strutturali tra le varie formazioni affioranti nonché le relative analogie litologiche. Il bacino è prettamente caratterizzato dai depositi neogenici ed in particolare dai litotipi sabbioso-cementati, argillosi e sabbioso-argillosi delle formazioni di S. Vivaldo (Zancleano-Piacenziano), delle Argille Azzurre (Piacenziano) e di Villamagna (Pliocene inferiore-medio). I depositi risalenti al Pleistocene inferiore affiorano in modo assai limitato lungo il settore nord-occidentale del bacino e sono costituiti dai sedimenti marini e marino-costieri relativi alla Formazione delle Sabbie di Nugola Vecchia, a quella delle Argille e Limi di Villa Nuova di Peccioli ed alla Formazione delle Sabbie ed Argille ad *Artica islandica*. Le formazioni che costituiscono il basamento pre-neogenico della Dorsale Medio Toscana affiorano unicamente nel quadrante orientale del bacino. Sebbene dal punto di vista litologico le formazioni liguri presentino tra loro molte analogie, le formazioni appartenenti Complesso di M. Carulli appaiono caratterizzate da un elevato grado di tettonizzazione, con una serie di superfici di taglio e pieghe presenti a diversa scala, tale da non consentirne la classificazione solo su base litologica. In tal senso, per le formazioni appartenenti al Complesso di M. Carulli è stato necessario predisporre una classe propria. Per quanto concerne i terreni della Falda Toscana, mentre il Macigno e il Calcare Cavernoso sono stati inseriti in classi proprie, la Formazione di Brolio per analogia litologica è stata inserita assieme alle formazioni liguridi argillitiche e calcilutitiche. Le formazioni anagenitiche e scistoso-porfiriche che caratterizzano la serie permo-triassica toscana metamorfica hanno necessariamente richiesto la costituzione di una specifica classe.

Al fine di realizzare l'elaborato di base relativo al fattore litologia, la carta geologica è stata scannerizzata, importata in ArcGIS, rettificata, georeferenziata e digitalizzata in un formato vettoriale poligonale. La fase di digitalizzazione è stata eseguita attraverso l'utilizzo del metodo topologico di ArcGIS. Anche se tale metodo risulta essere una via assai complicata per la digitalizzazione di elementi poligonali (richiede una spesa di tempo assolutamente non trascurabile), esso a differenza di altre metodologie consente di evitare il problema connesso con la comparsa di poligoni fantasma derivanti da una digitalizzazione non perfetta. Dalla carta geologica sono quindi state estratte le differenti classi in base alle analogie litologiche e strutturali delle varie formazioni rilevate. Inoltre, considerando che nell'area di studio moltissime frane sono occorse in corrispondenza dei corpi di altri fenomeni franosi, è stato ritenuto importante considerare nell'analisi statistica l'elemento corpo di frana come singola classe. Nel complesso, per questo fattore sono state utilizzate le seguenti 11 differenti classi:

I) Limi e limi sabbioso-argillosi (alluvioni recenti ed attuali).
II) Sabbie limose con livelli ghiaiosi (alluvioni terrazzate).
III) Alternanza di sabbie ed argille (Formazione di Villamagna, Formazione delle Sabbie di Nugola Vecchia, Formazione delle Sabbie ed Argille ad Artica Islandica).
IV) Argille (Formazione delle Argille e Limi di Villa Nuova di Peccioli, Formazione delle Argille Azzurre).
V) Complesso ofiolitico di base (Complesso del Poggio di M. Carulli).
VI) Corpo di frana.
VII) Filladi e quarziti (Serie permo-triassica toscana metamorfica).
VIII) Argilliti intervallate a livelli calcilutitici e calcarenitici (Flysch di Montaione, Formazione di Brolio).
IX) Formazioni calcaree (Calcare Cavernoso e Travertini).
X) Arenarie torbiditiche quarzoso-feldspatiche (Macigno).
XI) Formazioni sabbioso-cementate (Formazione di S. Vivaldo).

L'estensione di ogni singola classe e la relativa densità degli OSP calcolata per ogni tipologia di frana sono riportate in Figura 2. All'interno della classe III è stata inserita anche la Formazione delle Sabbie di Nugola Vecchia, in quanto nel bacino affiora una facies leggermente più argillosa, costituita da un'alternanza di sabbie e livelli argilloso-limosi tale da non



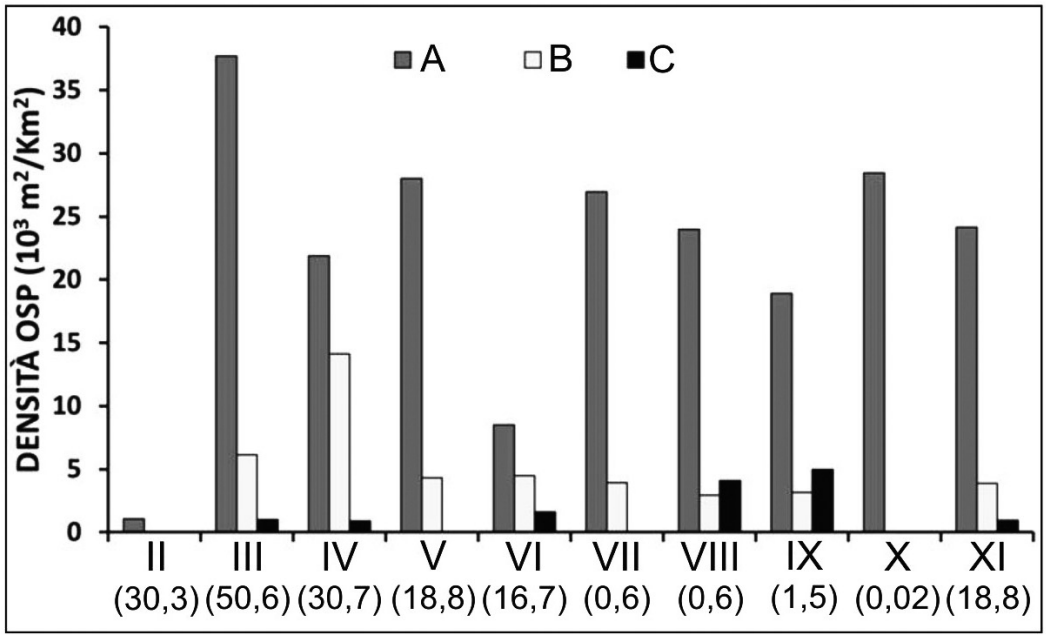


Fig. 2 - Carta delle classi litologiche usate nell'analisi statistica e densità degli OSP relative alle diverse tipologie di frana considerate (A, scorrimenti traslativi; B, colamenti; C, scorrimenti rotazionali) (la densità è espressa in m^2/Km^2). Per ogni classe sono riportate, tra parentesi, le relative estensioni, espresse in percentuale, rispetto all'area totale del bacino.

poterla considerare prettamente sabbiosa o comunque associabile alle formazioni della classe XI. Per limitare quindi il problema connesso con l'inserimento di classi litologiche poco estese e statisticamente poco significative (la formazione delle Sabbie di Nugola Vecchia ha un'estensione inferiore al 1%) è stata considerata complessivamente più affine alla classe in questione. Il problema della significatività statistica delle classi litologiche create è sorto in modo non risolvibile invece per quelle formazioni presenti in limitate aree e per le quali non è stato possibile un raggruppamento per analogia con altre formazioni più estese. Questo, è il caso delle formazioni pre-neogeniche che seppur litologicamente molto differenti si estendono su di un'area complessiva inferiore al 3% della superficie totale del bacino. Tuttavia, per queste formazioni sarebbe stato impossibile creare un'unica classe, poiché sarebbero state assimilate formazioni totalmente differenti sia dal punto di vista litologico che da quello meccanico. Nell'ambito di questo aspetto occorre specificare che l'associazione di formazioni differenti in base alla densità del fenomeno studiato è assolutamente sbagliata in un'ottica di analisi multifattoriale, in quanto, così facendo, si presuppone implicitamente che le distribuzioni degli altri fattori predisponenti all'interno delle diverse formazioni siano a priori identiche. Tralasciando le classi meno estese, è possibile notare come ad una prima indagine la distribuzione degli OSP mostri una forte correlazione con le differenti realtà litologiche (Fig. 2). Di fatto, è possibile osservare come la densità relativa degli OSP, per ogni tipologia di frana studiata, subisca sensibili variazioni come ad esempio tra le classi II, IV ed XI, che risultano le più estese.

Fattori derivati dal DEM

Tra i fattori morfometrici solitamente utilizzati nella valutazione della suscettività, la pendenza dei versanti (*slope angle*) e l'esposizione dei versanti (*slope aspect*) risultano essere i più comuni. Mentre la pendenza dei versanti è riconosciuta come uno dei fattori predisponenti più importanti, il ruolo dell'esposizione dei versanti è ancora molto dibattuto.

Nell'area di studio la pendenza e l'esposizione dei versanti sono stati derivati direttamente dal DEM, con una risoluzione di 10 m, trasformando il TIN in GRID. Il TIN è stato generato per interpolazione delle curve di livello e dei punti quotati, estratti dalle carte topografiche della Regione Toscana in scala 1:10.000 (*Shape files*). Entrambi i fattori morfometrici, espressi in forma raster, sono stati poi riclassificati e trasformati in un formato vettoriale (*feature class* poligonale) al fine di facilitare la costruzione di mappe delle UCU. La pendenza è stata riclassificata in sei categorie con estensione areale simile (metodo dei percentili), mentre l'esposizione è stata riclassificata nei classici otto settori angolari, di 45° di ampiezza, presi in senso orario a partire da Nord. Per queste classi, le densità degli OSP sono riportate in Figura 3.

La scelta di suddividere l'esposizione dei versanti attraverso una procedura differente da quella applicata per tutti gli altri fattori derivati dal DEM è giustificata dal fatto che essendo l'influenza di questo fattore nell'ingenerare il fenomeno frana ancora fortemente dibattuta è stato ritenuto idoneo utilizzare la suddivisione in classi più usata nella letteratura scientifica, così da confrontare con quanto esiste in letteratura. Occorre specificare che anche se usata una metodologia di classificazione differente da quella per aree simili, le classi realizzate per questo fattore assumono comunque estensioni statisticamente significative.

Da una prima analisi statistico-descrittiva appare chiaro come l'esposizione dei versanti abbia una forte correlazione con il fenomeno frana, soprattutto per quanto concerne le tipologie di scorrimento traslativo e di colamento (Fig. 3). È evidente come per queste tipologie di frana i versanti esposti a NW e quelli esposti a S e SE siano maggiormente favorevoli nei confronti dell'instabilità. Una tale concentrazione dei fenomeni franosi appare correlabile con la presenza nel settore di NW di condizioni generalmente più umide rispetto agli altri, mentre quella relativa ai settori SW e SE può essere attribuita fondamentalmente alle maggiori escursioni termiche (Regmi *et al.*, 2010; Yalcin *et al.*, 2011). Una simile correlazione, anche se valutata in modo qualitativo e senza un'analisi multifattoriale, risulta in linea con quanto osservato da molti autori per settori posti alle medie latitudini (Magliuolo *et al.*, 2008; Regmi *et al.*, 2010; Yalcin *et al.*, 2011; Federici *et al.*, 2011; Federici *et al.*, in stampa). Occorre aggiungere, infine, che per le frane di scorrimento rotazionale non sembra che l'esposizione dei versanti rappresenti un importante fattore predisponente. Questo, in prima analisi, può essere attribuito al fatto che nel bacino del T. Roglio le frane di scorrimento rotazionale hanno una superficie di scorrimento generalmente più profonda rispetto a quelle che caratterizzano le altre tipologie di frana. Quindi, è possibile che la loro distribuzione spaziale non risenta né delle diverse escursioni termiche né tantomeno della variazione nel tasso di umidità dovute alla differente esposizione dei versanti.

Per quanto concerne la pendenza dei versanti, l'importanza nella predisposizione del fenomeno franoso è ben chiara e visibile soprattutto per le frane di scorrimento traslativo, dove l'incremento della pendenza è associato ad un incremento progressivo della densità di frana (Fig. 3).

Distanza dagli elementi idrografici, tettonici e morfologici

In considerazione del fatto che l'evoluzione del bacino del T. Roglio appare strettamente connessa con l'attività tettonica e con l'erosione torrentizia, è stato ritenuto indispensabile considerare questi fattori come potenzialmente predisponenti lo sviluppo delle frane. Oltre a questi è stato introdotto nella procedura anche un ulteriore fattore, connesso con la distanza dalle scarpate di degradazione, visto che nel settore indagato molti fenomeni franosi appaiono concentrati proprio in corrispondenza dei calanchi. Gli elaborati inerenti le distanze dagli elementi dell'idrografia, da quelli tettonici e dalle scarpate di degradazione sono stati derivati, in forma vettoriale, direttamente dalle carte geomorfologica e geologica. La procedura è consistita nell'estra-

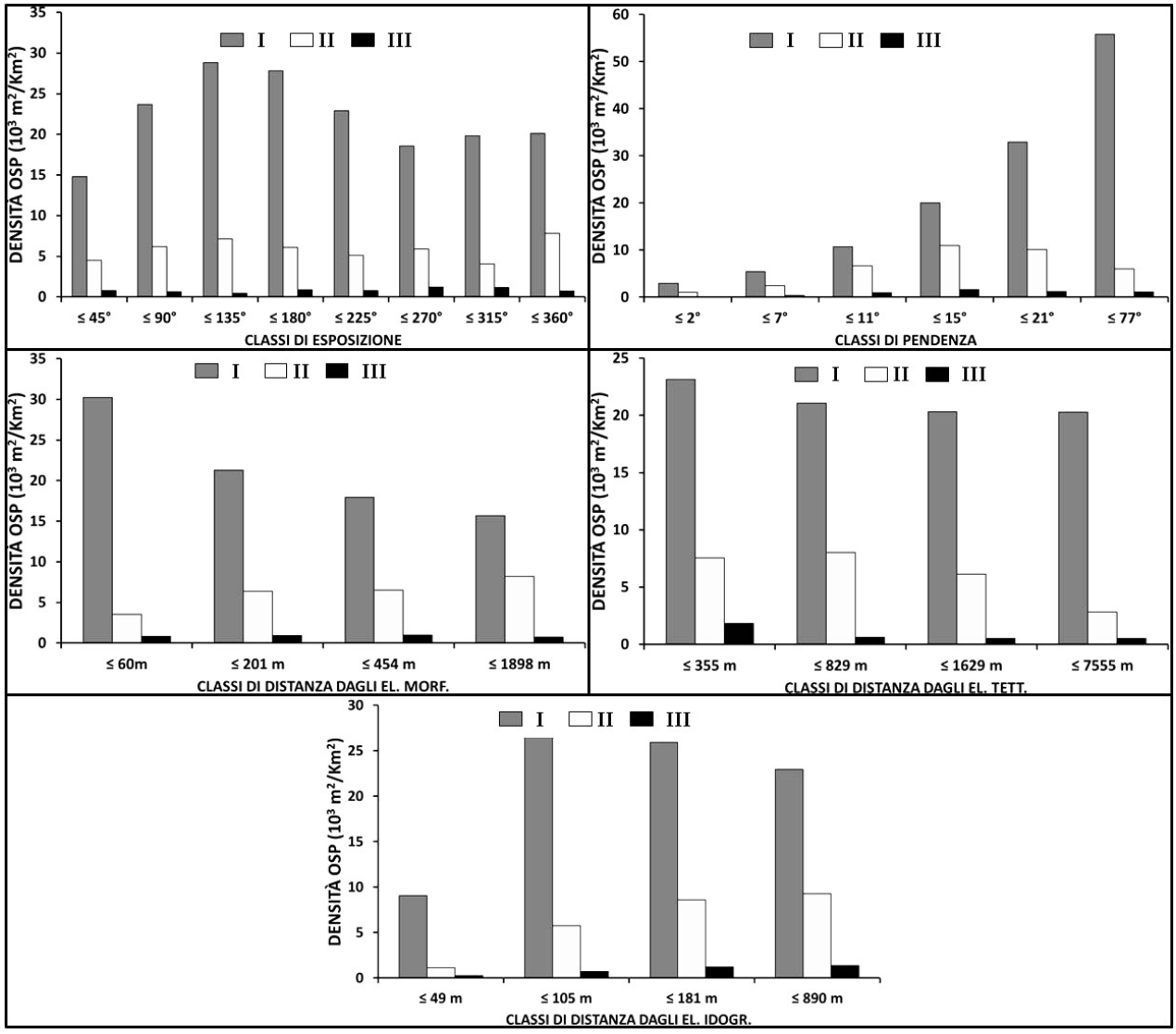


Fig. 3 - Ciascun grafico mostra, per uno dei fattori presi in esame, le classi di densità degli OSP relative alle diverse tipologie di frana considerate (I, scorrimenti traslativi; II, colamenti; III, scorrimenti rotazionali).

zione degli elementi lineari in esame dagli elaborati geologici e geomorfologici precedentemente digitalizzati in ArcGIS e nel *buffering* di questi in relative feature-class poligonali. Gli elaborati così creati sono stati successivamente riclassificati nei loro attributi e le classi definite tramite il criterio dei percentili. Per ciascuno dei tre fattori considerati la relativa densità degli OSP è riportata in Fig. 3. Ad una prima osservazione è intuibile la correlazione tra le tipologie dei movimenti franosi ed i tre fattori in esame. Soprattutto le frane di scorrimento traslativo sembrano avere una correlazione negativa con le distanze dagli elementi tettonici e dalle scarpate morfologiche per le quali maggiore è la distanza e minore appare l'influenza nel generare questo tipo di frane. Viceversa, le frane di colamento e di scorrimento rotazionale presentano per questi due fattori una correlazione sostanzialmente differente. All'aumentare della distanza dalle scarpate morfologiche si ha un sensibile incremento della densità di queste tipologie di frana (Fig. 3). Le variazioni delle densità nei confronti della distanza dagli elementi tettonici mostrano per i colamenti un flesso in corrispondenza delle classi di distanza intermedie, mentre gli scorrimenti rotazionali non hanno variazioni sensibili. Questo andamento per le colate denota, in un ottica descrittiva ed univariata, il limite entro il quale si dovrebbe estende l'influenza degli elementi tettonici nell'ingenerare queste tipologie di frana. Un simile andamento può essere osservato per le frane di scorrimento traslativo nei confronti del fattore distanza dagli elementi dell'idrografia per il quale l'influenza sembrerebbe estendersi fino a circa 100 m (Fig. 3).

Procedura per l'assegnazione della suscettività

Inizialmente è stata eseguita una analisi statistica preliminare di tipo univariato (tabella di contingenza) al fine di comprendere e definire quantitativamente le possibili relazioni tra ogni singolo fattore (variabile predittiva) e l'occorrenza delle frane. Questa analisi è stata condotta per ogni singola tipologia di frana. Per testare l'associazione tra ogni fattore e l'evento frana è stato calcolato il coefficiente Chi^2 (χ^2) ed estratto da questo il coefficiente ϕ di Cramer (Fig. 4a). Da questa prima analisi statistica è stato possibile accertare come i fattori selezionati abbiano un alto grado di associazione nei confronti dell'evento frana. Soltanto l'esposizione e la distanza dagli elementi morfologici denotano bassi valori ϕ di Cramer nei confronti delle frane di scorrimento rotazionale, mentre per le frane di scorrimento traslativo si denotano bassi valori del ϕ di Cramer esclusivamente nei confronti della distanza dagli elementi tettonici. Tra tutti i fattori considerati, l'analisi statistica univariata propone la litologia e la pendenza dei versanti come i fattori con i più alti gradi di associazione con la distribuzione dei fenomeni franosi.

L'analisi condizionale è stata successivamente eseguita al fine di valutare le relazioni tra la distribuzione dei fenomeni franosi ed i fattori considerati sia simultaneamente che in ogni possibile combinazione. Sebbene, il metodo dell'analisi condizionale sia estremamente semplice dal punto di vista concettuale, dal punto di vista operativo presenta alcune complicazioni in quanto tale metodo necessita di essere applicato molte volte per una singola area di studio e per ogni differente tipologia di frana introdotta nell'analisi. Per questo motivo è stato creato un *Model-Builder* (*script*) in ArcGIS (ESRI) nel quale sono stati automatizzati tutti i processi di elaborazione spaziale necessari alla creazione dei modelli predittivi. Nel *Model-Builder* sono stati elaborati per *overlay* topologico tutte le possibili 63 combinazioni dei fattori considerati nei confronti di ogni tipologia di frana. Ogni singola combinazione è stata processata (*intersect*) con i *buffer* degli OSP appartenenti alle frane precedenti il 1975. Per ogni UCU è stato così calcolato il rapporto tra la somma dell'area coinvolta nei *buffer* in questione e l'area totale della UCU stessa. In seguito tutte le UCU sono state raggruppate in cinque classi di densità sulla base del valore del rapporto osservato. Per la definizione delle classi di densità (classi di suscettività) è stato usato un metodo simile a quello creato da Clerici *et al.* (2010). Le classi sono definite sulla base della densità media (MD) degli OSP, calcolata dividendo la somma totale delle aree comprese nel buffer degli OSP e l'area totale del bacino in esame (probabilità a priori). Questo valore (MD) rappresenterà il punto medio della classe media. Più precisamente, gli intervalli (Ci) delle classi della carta della suscettività sono definiti come $Ci = (Md/5) \times 2$ e le classi così definite sono caratterizzate dai seguenti campi di esistenza delle densità: 0-Ci (*Very Low*), Ci-2Ci (*Low*), 2Ci-3Ci (*Medium*), 3Ci-4Ci (*High*) and 4Ci-5Ci (*Very High*).

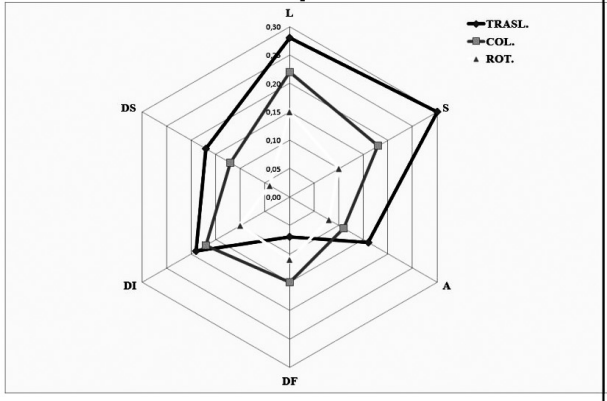
Per ognuna delle tre tipologie di frane considerate, sono stati creati tutti i possibili 63 modelli. Successivamente è stata realizzata (sempre all'interno del *Model-Builder*) una procedura di validazione al fine di scegliere il modello predittivo migliore. La procedura di validazione si basa sul concetto «wait and see» che è l'unica rigorosa via per valutare correttamente l'affidabilità dei modelli nella previsione della variabile dipendente. In questo metodo la distribuzione nelle varie classi di suscettività degli OSP pre-1975 (gruppo di costruzione) viene comparata con quella relativa agli OSP post-1975 (gruppo di validazione). Per ognuna delle cinque classi di suscettività è stato quindi calcolato il valore assoluto della differenza tra la le percentuali degli OSP pre e post 1975. La somma di questo valore tra le classi di suscettività è definito come Errore di Validazione (VE) ed è stato calcolato per ogni modello costruito. Il coefficiente VE definisce la capacità predittiva di un modello ed ha un campo di esistenza che varia tra 0 (massima capacità predittiva) e 200 (minima capacità predittiva). In accordo con Clerici *et al.* (2010), una buona validazione è un requisito necessario ma non sufficiente per definire l'efficienza di un modello. Un buon modello dovrebbe avere una grande dispersione attorno alla densità media (alta capacità di risoluzione) per distinguere tra livelli significativi di densità di frana. Con questo scopo, è stata calcolata per ogni modello la deviazione media della densità degli OSP (MD) ed'è stato utilizzato il rapporto MD/VE (*Best Model Index, BMI*) per la scelta del modello migliore. I 10 modelli migliori derivati dall'analisi condizionale sono presentati in Figura 4b per ogni tipologia di frana.

Discussione e conclusioni

Il Metodo dell'Analisi Condizionale applicato agli OSP mostra per il bacino del T. Roglio una migliore capacità predittiva per le frane di scorrimento traslativo e per quelle di colamento dove la combinazione dei fattori esposizione, distanza dagli elementi idrologici e tettonici per le prime (ADIDF), e litologia, pendenza, distanza dagli elementi tettonici e morfologici per le seconde (LSDFDS), costituiscono i migliori modelli predittivi con un BMI rispettivamente di 576,0 e 322.7 (Fig. 4b). Per le frane di scorrimento rotazionale il miglior modello è rappresentato dalla combinazione dei fattori pendenza, distanza dagli elementi idrologici e tettonici (SDIDF). Considerando i risultati dell'analisi univariata, e l'occorrenza nei migliori 10 modelli dei fattori presenti per ogni singola tipologia di frana Figura 4a, b, il Metodo dell'Analisi Condizionale definisce nel complesso un'importanza dei fattori in gioco chiaramente diversa ed appare maggiormente discriminante. Ad esempio per le frane traslative, dove l'analisi univariata ha mostrato per la litologia un maggior grado di associazione nei confronti della variabile dipendente, appare evidente come l'elemento maggiormente ricorrente tra i 10 miglior modelli non sia il fattore litologia, bensì quello relativo alla distanza dagli elementi idrologici. Inoltre, il modello con capacità predittiva migliore è rappresentato, sempre per le frane di scorrimento traslativo, da una combinazione

4a

a	L	S	A	DF	DI	DS
TRASL.	0,28	0,30	0,16	0,07	0,19	0,17
COL.	0,22	0,18	0,11	0,15	0,17	0,12
ROT.	0,15	0,10	0,08	0,11	0,10	0,04



4b

TRASL.	VE	MD	IBM	COL.	VE	MD	IBM	ROT.	VE	MD	IBM
ADIDF	6,3	3629	576,0	LSDFDS	7,0	2259	322,7	SDIDF	10,1	373	36,9
LSADI	29,2	14140	484,2	SDDS	8,6	2498	290,5	LDF	17,3	591	34,2
LADI	25,2	11244	440,9	LDIDS	8,4	2397	285,4	LSDF	19,0	609	32,1
LDI	20,5	8966	437,4	LDIDF	6,5	1752	269,5	LDIDF	36,4	781	21,5
LSDI	24,6	10668	433,7	LSDI	13,4	3493	260,7	DIDFDS	19,8	409	20,7
ADI	5,5	2338	425,1	SDIDF	9,2	2227	242,1	LDS	32,9	653	19,8
LADIDF	27,9	10594	379,7	DIDFDS	9,3	2145	230,6	LSDI	71,3	1399	19,6
SDIDF	23,5	8163	347,4	SADS	10,8	2154	199,4	LDFDS	28,9	565	19,5
LDIDF	25,2	8448	335,2	LSDIDF	14,2	2799	197,1	LDI	58,5	1033	17,7
SDI	24,5	8209	335,1	LDIDFDS	13,8	2624	190,1	L_SDS	47,5	745	15,7

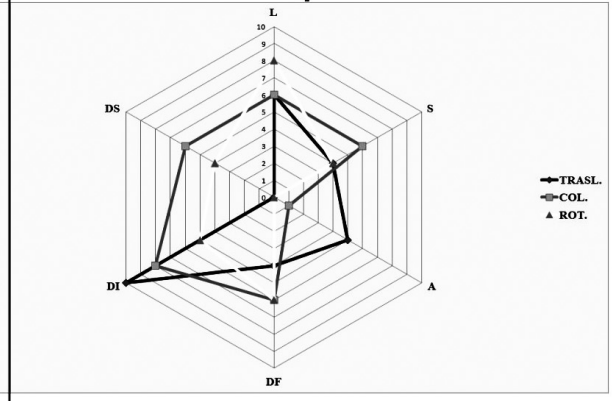


Fig. 4 - a) Nella tabella sono indicati i valori del coefficiente ϕ di Cramer indicativi del grado di associazione tra i diversi fattori considerati e i tipi di frana. Inoltre è mostrato anche il grafico derivante dalla tabella proposta (L, litologia; S, pendenza; A, esposizione; DI, distanza dagli elementi idrografici; DF, distanza dagli elementi tettonici; DS, distanza morfologici dalle scarpate di degradazione.). b) Primi 10 modelli per ogni singola tipologia di frana e grafico relativo all'occorrenza dei vari fattori.

di fattori dove quello relativo alla litologia ed alla pendenza, che nell'univariata avevano un coefficiente ϕ di Cramer rispettivamente di 0,28 e 0,30, non compaiono affatto. Questo conferma come l'analisi condizionale abbia una capacità predittiva maggiore rispetto all'univariata di estrarre le relazioni tra le covariate introdotte e la variabile dipendente, giacché l'analisi univariata non considera le mutue relazioni fra tutti i fattori predisponenti.

Per ogni tipologia di frana il VE tende generalmente ad aumentare all'aumento del numero dei fattori presenti. L'aumento del coefficiente VE è strettamente connesso con l'introduzione di un numero grande di piccole UCU che hanno una piccola significatività statistica (Clerici *et al.*, 2010). La presenza di piccole UCU rende meno efficiente la scelta degli OSP come rappresentazione della variabile dipendente. Infatti, le UCU individuate degli OSP sono tanto meno rappresentative delle condizioni al contorno presenti in corrispondenza della nicchia di distacco prima dello sviluppo della frana quanto più le UCU sono numerose e di piccole dimensioni.

Nel complesso il Metodo dell'Analisi Condizionale applicato agli OSP presenta una capacità predittiva non totalmente soddisfacente per le frane di colamento e per quelle rotazionali. La capacità predittiva dei migliori modelli per le due tipologie di frana infatti varia da 7,0 per i colamenti a 10,1 per le frane rotazionali. Questa discrepanza può riflettere la presenza di frane appartenenti a queste tipologie con un'estensione degli OSP statisticamente differente. Mentre le colate e gli scorrimenti traslativi che hanno VE simili presentano valori medi delle lunghezze degli OSP rispettivamente di 112,8 m e 100,7 m (con deviazione standard di. 52,7 m e 46,0 m), gli OSP delle frane di scorrimento rotazionale hanno lunghezze medie di 198,5 m (con deviazione standard di 125,4 m). L'abbassamento della capacità predittiva correlata con l'aumento della lunghezza media degli OSP potrebbe rivelare una non trascurabile sensibilità del metodo in esame nei confronti dei processi di degradazione che nel tempo coinvolgono le scarpate delle frane, causandone un'evoluzione regressiva ed un loro arretramento verso monte. L'arretramento degli OSP implica nel processo di buffering una definizione delle UCU che non sono strettamente connesse con quelle che erano presenti prima dello sviluppo della frana. Tanto più quindi l'effetto di arretramento si è esplicato e tanto minore sarà la capacità predittiva del Metodo dell'Analisi Condizionale applicato agli OSP. In un settore come quello in esame, dove affiorano prevalentemente terreni sabbiosi ed argillosi fortemente soggetti all'azione di degradazione esplicata dagli agenti meteorici (Rapetti *et al.*, 2006; Battaglia *et al.*, 2011), è facilmente intuibile come l'applicazione del Metodo dell'Analisi

Condizionale agli OSP, come rappresentazione della variabile dipendente, possa dare risultati sensibilmente condizionati proprio dai fenomeni connessi con la degradazione delle scarpate di frana. Questo problema appare particolarmente accentuato quindi per le frane di grandi dimensioni, per frane originatesi in corrispondenza di litologie estremamente degradabili e per le frane antiche. Perciò, l'introduzione nell'analisi statistica in esame di frane antiche e di grosse dimensioni può portare alla costruzione di un modello della suscettività con bassa capacità predittiva. Anche se le frane antiche non fossero utilizzate per la creazione dei modelli, l'applicazione del metodo in esame in aree dove affiorano litologie fortemente degradabili potrebbe comunque mostrare una bassa capacità predittiva. La scelta degli OSP come rappresentazione del fenomeno frana appare in definitiva applicabile con risultati migliori in aree dove affiorano litologie più resistenti alla degradazione e per dataset di frane che non presentino fenomeni antichi. In terreni come quelli affioranti nel bacino del T. Roglio sarebbe consigliabile l'applicazione del metodo dell'analisi condizionale agli OSP mediante l'utilizzo di un dataset di costruzione dei modelli composto da frane più recenti in relazione all'intensità locale dei processi di degradazione.

Ringraziamenti

Questo studio è stato finanziato con i fondi del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa relativi al progetto LAMMA «Realizzazione della cartografia di stabilità dei versanti relativa ad una quota parte del territorio toscano» (Responsabile, prof. P.R. Federici). L'autore è grato a Paolo Roberto Federici ed Aldo Clerici, per i loro preziosi suggerimenti e le discussioni sempre costruttive.

Bibliografia

Atkinsons P.M., Massari R., 1998. Generalised linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Comput. Geosci*. 24 (4): 373-385.

Ayalew L., Yamagishi H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65: 15-31.

Battaglia S., Leoni L., Rapetti F., Spagnolo M., 2011. Dynamic evolution of badlands in the Roglio basin (Tuscany, Italy). *Catena* 86: 14-23.

Blahut J., van Westen C.J., Sterlacchini S., 2010. Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology* 119: 36-51.

Bossio A., Costantini A., Lazzarotto A., Liotta D., Mazzanti R., Mazzei R., Salvatorini G., Sandrelli F., 1993. Rassegna sulle conoscenze sulla stratigrafia del Neoautoctono toscano. *Mem. Soc. Geol. It*. 49: 17-98.

Buccianti A., Rosso F., Vlacci F., 2003. Metodi matematici e statistici nelle scienze della terra. Vol., 3. Tecniche statistiche. Liguori, Napoli, 538 pp.

Can T., Nefeslioglu H.A., Gokceoglu C., Sonmez H., Duman T.Y., 2005. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology* 72: 250-271.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara A., Guzzetti F. (Eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands pp. 135-175.

Chung C.F., Fabbri A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 65 (12): 1389-1399.

Chung C.F., Fabbri A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Nat. Hazards* 30 (3): 451-472.

Chung C.F., Fabbri A.G., 2008. Predicting landslides for risk analysis-spatial models tested by a cross-validation procedure. *Geomorphology* 94: 438-452.

Chung C.F., Fabbri A.G., Van Westen C.J., 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), Geographic Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 107-133.

Clerici A., 2002. A GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation. In: Ciolli M, Zatelli P, (Eds.), Open source free software GIS-GRASS users conference, Trento, Italy. http://www.ing.unitn.it.

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

Clerici A., Perego S., Tellini C., Vescovi P., 2006. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environ. Geol*. 50 (7): 941-961.

Clerici A., Perego S., Tellini C., Vescovi P., 2010. Landslide failure and runout susceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy). *Nat. Hazards* 52: 1-29.

Conoscenti C., Di Maggio C., Rotigliano E., 2008. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology* 94: 325-339.

Costantini A., Elter F.M., Pandelli E., Sandrelli F., 1998. Geologia dell'area di Iano (Toscana, Italia). *Boll. Soc. Geol. It.* 117: 187-218.

D'Amato Avanzi G., Puccinelli A., 1989. La valle villafranchiana della Turrite di Gallicano (Val di Serchio) e le sue implicazioni neotettoniche. *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat*. 1: 147-154.

Falaschi F., Federici P.R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Pochini A., Spagnolo M., Bottai M., Salvati N., 2008. Statistical approach and Gis techniques in evaluating landslide susceptibility in a sample area of the Serchio River Basin (Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 1: 119-136.

Federici P.R., Rau A., 1980. Note illustrative della neotettonica del Foglio 104 Pisa. In: Contrib. Prelim. Realizz. Carta Neotett. d'It., *C.N.R.-P.F. Geodin.* 356: 1383-1398.

Federici P.R., Puccinelli A., Cantarelli E., Casarosa N., D'amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Pochini A., Ribolini A., Bottai M., Salvati N., Testi C., 2005. Uso di tecniche Gis nella valutazione della pericolosità di frana nella valle del Serchio (LU). Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA 2: 1059-1064.

Federici P.R., Puccinelli A., Cantarelli E., Casarosa N., D'amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Pochini A., Ribolini A., Bottai M., Salvati N., Testi C., 2007. Multidisciplinary investigations in evaluating landslide Hazard. An example in the Serchio River valley (Italy). *Quaternary International* 172: 52-63.

Federici P.R., Puccinelli A., Bottai M., Capitani M., Casarosa N., D'amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Marchetti D., Rapetti F., Ribolini A., Salvati N., Testi C., 2011. Carta della pericolosità geologica per instabilità dei versanti secondo l'analisi statistica multivariata. Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana. ISPRA, Regione Toscana, Firenze.

Federici P.R., Puccinelli A., Bottai M., Capitani M., Casarosa N., D'amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Marchetti D., Rapetti F., Ribolini A., Salvati N., Testi C., in stampa. Note illustrative della carta della pericolosità geologica per instabilità dei versanti alla scala 1:50.000. Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana. ISPRA, Regione Toscana, Firenze.

Frattini P., Crosta G., Carrara A., 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology* 111: 62-72.

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181-216.

Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81: 166-184.

Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., 2009. Landslide Hazard Assessment, vulnerability estimation and risk evaluation: An example from the Collazzone Area (Central Umbria, Italy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat*. 32: 183-192.

Ghosh S., Carranza E.J.M., van Westen C.J., Jetten V.G., Bhattacharya D.N., 2011. Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India). *Geomorphology* 131: 35-56.

Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., Chacón J., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Technical report. Earth Surface Processes and Landforms* 24: 537-544.

Irigaray C., Fernandez T., El Hamdouni R., Chacon J., 2007. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Nat. Hazards* 41 (1):61-79.

Keefer D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of American Bulletin* 95: 406-421.

Melchiorre C., Castellanos Abella E.A., van Westen C.J., Matteucci M., 2011. Evaluation of prediction capability, robustness, and sensitivity in non-linear landslide susceptibility models, Guantánamo, Cuba. *Computers and Geosciences* 37 (4): 410-425.

Magliuolo P., Di Lisio A., Russo F., Zelano A., 2008. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Nat. Hazards* 47: 411-435.

Mannucci P., Rapetti F., Salvetti A., Spagnolo M., 2008. Variazioni nell'uso del suolo nel bacino idrografico del T. Roglio (Val d'Era, Toscana) nell'ultimo cinquantennio. *L'Italia Forestale e Montana* LXIII (2): 161-182.

Morgan B.W., 1968. An introduction to Bayesian statistical decision process. Prentice-Hall, New York, 116 pp.

Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Durmaz S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology* 94: 401-418.

Puccinelli A., 1987. Un esempio di tettonica recente nella valle del Serchio: il sollevamento di Monte Perpoli. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A* 94: 105-117.

Rapetti F., Salvetti A., Spagnolo M., 2006. Lineamenti Geomorfologici del bacino del T. Roglio (Val d'Era, Toscana). In: Rodolfi G. (Ed.), Atti del Convegno conclusivo (PRIN/CONFIN 2002): Erosione idrica in ambiente mediterraneo, valutazione diretta ed indiretta in aree sperimentali e bacini idrografici. Firenze, 17 Dicembre 2004, pp. 105-124.

Regmi N.R., Giardino J.R., Vitek J.D., 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology* 115: 172-187.

Rossi M., Guzzetti F., Reichenbach P., Mondini A.C., Peruccacci S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology* 114: 129-142.

Süzen M.L., Doyuran V., 2004a. Data-driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng. Geol*. 71 (3): 303-321.

Süzen M.L., Doyuran V., 2004b. A comparison of the GIS-based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environ. Geol*. 45 (5): 665-679.

Trevisan L., 1952. Sul complesso sedimentario del Miocene superiore e del Pleistocene della Val di Cecina e sui nuovi movimenti tettonici tardivi in rapporto ai giacimenti di lignite e di salgemma. *Boll. Soc. Geol. It*. 70: 65-78.

van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: an overview. *Eng. Geol*. 102: 112-131.

Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85: 274-287.

(ms. pres. il 7 ottobre 2011; ult. bozze il 30 luglio 2012)