

V. NOTI (\*)

## UNA CARTA DELLA STABILITÀ POTENZIALE DEI VERSANTI DI UN'AREA DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE REALIZZATA MEDIANTE L'ANALISI CONDIZIONALE E L'UTILIZZO DI UN SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO

**Riassunto** – È stata realizzata una Carta della Stabilità Potenziale dei Versanti alla scala 1:10000 della zona compresa tra M. Prato Fiorito e Alpe Tre Potenze (Appennino Settentrionale, Provincia di Lucca), mediante l'utilizzo di un Sistema Informativo Geografico. La metodologia applicata per la valutazione della stabilità dei versanti è l'Analisi Condizionale della quale sono stati discussi i risultati mettendone in evidenza le potenzialità ed i limiti. Tale valutazione è stata preceduta da un rilevamento geomorfologico di dettaglio che ha fornito un quadro completo dei fenomeni che hanno agito sul territorio e delle loro tendenze evolutive.

L'Analisi Condizionale è basata sulle relazioni statistiche tra alcuni fattori geo-ambientali ed il verificarsi delle frane ed è stata associata ad unità di terreno chiamate Unità di Condizioni Uniche (UCU), originate dalla sovrapposizione di sei tematismi: litologia, rapporti tra giaciture degli strati e versanti, acclività, lunghezza dei versanti, posizione relativa sui versanti e uso del suolo.

Per quanto riguarda il Sistema Informativo Geografico, è stato utilizzato GRASS, un GIS di pubblico dominio operante sotto sistemi operativi di tipo UNIX, sia su workstation che su PC.

La Carta di Stabilità, ottenuta utilizzando come elemento di dissesto gli orli di nicchia di frana, ha rivelato la maggiore estensione areale delle classi estreme: il 49,31% dell'area è caratterizzato da instabilità molto bassa mentre i settori del territorio con instabilità molto alta occupano oltre un quinto dell'area totale (21,96%).

La metodologia utilizzata si è rivelata un valido strumento per la realizzazione della cartografia della stabilità dei versanti, integrandosi perfettamente con il GIS che ha consentito l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in tempi brevi e a costi contenuti.

**Parole chiave** – Rilevamento geomorfologico, Sistema Informativo Geografico (GIS), orli di nicchia di frana, Densità di Dissesto, Unità di Condizioni Uniche (UCU), Carta della Stabilità Potenziale dei versanti.

**Abstract** - *A Map of Potential Slope Stability in an area of the Northern Apennines produced by means of Conditional Analysis and the use of a Geographic Information System.* A 1:10000 scale Map of Potential Slope Stability was produced of the area between Mt. Prato Fiorito and Alpe Tre Potenze (Northern Apennines, Province of Lucca), using a Geographic Information System. The technique applied for the assessment of slope stability is Conditional Analysis. The results of this analysis are discussed,

pointing out the applicative possibilities and limitations. This assessment was preceded by a detailed geomorphologic survey which supplied a complete picture of the phenomena influencing the area and their evolutive tendencies.

Conditional Analysis is based on the statistical relations between some geo-environmental factors and the occurrence of landslides and has been associated with terrain units termed Unique-Condition Units (UCU). These are created by the superimposition of six thematic maps: lithology, strata-slope relationships, acclivity, slope-length, relative position on slopes and soil use.

As regards the Geographic Information System, the system used was GRASS, a public domain GIS functioning under UNIX-type operating systems, both on workstation and PC.

The Stability Map, obtained by using as an element of instability the landslide scarps, showed the greater areal extension of the extreme classes: 49,31% of the area is characterised by very low instability, whereas the sectors of the area with very high instability make up a fifth of the total area (21,96%).

The technique used was a valid tool for the production of a Map of Slope Stability due to its perfect integration with the GIS, which allowed us to obtain and elaborate data in a short time and at a limited cost.

**Key words** – Geomorphologic survey, Geographic Information System (GIS), landslide scarps, Instability Density, Unique-Condition Units (UCU), Map of Potential Slope Stability.

### INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il problema della valutazione della stabilità dei versanti ha suscitato un crescente interesse in Italia e all'estero data la sua relazione con le problematiche di pianificazione del territorio.

Nonostante i notevoli progressi che hanno interessato questo campo non esiste ancora un accordo né riguardo all'influenza svolta sulla instabilità dei versanti da parte dei diversi fattori geologici, morfologici, climatici ed antropici né riguardo alle metodologie proposte per la redazione di carte di stabilità. Il punto su cui tutti gli autori convergono è che i processi di instabilità dei versanti non sono frutto di

\* Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Pisa

Ricerca svolta con il contributo C.N.R., Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Linea 2 «Previsione e prevenzione di eventi franosi a grande rischio», Pubbl. n. 1835, U.O. 13 (Resp. Prof. P.R. Federici).

una singola causa ma di una molteplicità di fattori interagenti tra loro (GNGFG, 1987).

Molti sono stati i tentativi di schematizzazione delle metodologie di zonazione della stabilità dei versanti. Carrara *et al.* (1995), ad esempio, distinguono tra *metodi diretti*, consistenti essenzialmente nella cartografia geomorfologica attraverso la quale l'operatore identifica le frane passate e presenti e fa assunzioni su quei siti dove i dissesti sono più probabili a verificarsi in futuro e *metodi indiretti* che includono due differenti approcci: 1) un approccio euristico nel quale i fattori di instabilità sono classificati e pesati secondo la loro presunta importanza nel causare movimenti di massa; 2) un approccio statistico (o probabilistico) nel quale il ruolo di ogni fattore è determinato sulla base delle relazioni osservate con la distribuzione passata e presente delle frane.

Un tipo di elaborato risultante da tale processo di valutazione è la «Carta di Stabilità Potenziale dei Versanti» vale a dire una carta previsionale nella quale sono distinti i settori del territorio con diversa propensione al dissesto.

Nel presente lavoro la Carta di Stabilità Potenziale dei Versanti è stata ottenuta applicando, attraverso gli strumenti di un Sistema Informativo Geografico, la metodologia di Analisi Condizionale.

Questa metodologia, i cui risultati saranno discussi in seguito mettendone in evidenza le potenzialità ed i limiti, rappresenta un tentativo di analizzare l'influenza e le interrelazioni di alcuni fattori geoambientali sulla stabilità dei versanti basandosi tuttavia su concetti semplici e facilmente comprensibili anche da soggetti non particolarmente esperti del settore.

L'applicazione del metodo è stata preceduta da un rilevamento geomorfologico di dettaglio con il quale sono stati messi in evidenza i caratteri generali dell'area allo scopo di acquisire un quadro completo dei fenomeni che hanno agito sul territorio e delle loro tendenze evolutive.

#### INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

Il metodo è stato applicato ad un'area dell'Appennino Settentrionale situata in Provincia di Lucca e limitata a Nord dallo spartiacque principale della catena (Alpe Tre Potenze) e, a Sud, dal complesso del Monte Prato Fiorito-M. Coronato. I confini occidentali ed orientali sono dati approssimativamente dal fondovalle del T. Fegana e da quello del T. Scesta. L'area, con una estensione di 32,32 km<sup>2</sup>, è compresa nelle sezioni della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000: Montefegatesi, n° 250120; Abetone, n° 250080; Vico Pancellorum, n° 251090 (Fogli IGM 1:50000: Castelnuovo Garfagnana, 250 e Porretta Terme, 251).

Dal punto di vista geologico la zona è interessata dalle formazioni della Successione Toscana («Falda Toscana»). In particolare, i terreni affioranti sono rappresentati dalla formazione arenacea del Macigno (a Nord) e dalla porzione occidentale di quello che in

letteratura è stato chiamato «Nucleo Mesozoico della Val di Lima» (Bellincioni *et al.*, 1956; Bellincioni, 1959) ritenuto facente parte del fronte delle unità mesozoiche della Falda Toscana.

L'interpretazione tettonico-strutturale della Val di Lima è stata oggetto nel passato di dispute accademiche talora acce. Senza entrare nel merito delle problematiche affrontate in letteratura ci limitiamo ad osservare che gli studi più recenti, svolti da Fazzuoli *et al.* (1992; 1994), hanno confermato l'ipotesi di una tettonica plicativa polifasata, già proposta in passato da Baldacci *et al.* (1981), interessata successivamente da una tettonica fragile distensiva alto Pliocenica-Quaternaria con direzione prevalente NO-SE e, in secondo luogo, E-O e N-S.

Nell'area in esame i caratteri geologici più interessanti sono rappresentati innanzitutto dai rapporti tra Macigno e Scisti Policromi; il contatto è infatti tettonizzato e molto discordante (Val Fegana) con pieghe ettometriche sigillate dal Macigno con giacitura suborizzontale e tettonica relativamente blanda. Lo spessore degli Scisti varia inoltre da zona a zona per la presenza di laminazioni (Orrido di Botri, La Guezza). È lecito parlare di sovrascorrimento del Macigno, che ha sfruttato la plasticità delle Argilliti di Brolio (litofacies degli Scisti Policromi), sulla successione mesozoica (Fazzuoli *et al.*, 1994).

Il sistema di faglie tardive con componente normale e direzione prevalente NO-SE interessa l'area in modo intensivo ed ha originato alti e bassi strutturali (Campore, La Guezza, Prato Fiorito, Monte Mosca). Tale sistema è rappresentato principalmente dalla Faglia della Foggetta, ritenuta attiva ed impostata lungo il Rio Bormia e il Rio Ricavoli, con un rigetto stimato di circa 400 metri e dalla Faglia di Limano (impostata lungo il Rio della Sega).

#### CARTA E LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI

Il rilevamento geomorfologico è stato eseguito in scala 1:10000 sulla base della legenda proposta dal Gruppo di Lavoro per la Cartografia Geomorfologica (SGN-GNGFG, 1994).

Le forme, i depositi ed i processi sono stati suddivisi in 7 tipi:

- 1) Forme ed elementi litostrutturali.
- 2) Forme, processi e depositi di versante dovuti alla gravità.
- 3) Forme, processi e depositi fluviali e di versante dovuti al dilavamento.
- 4) Forme carsiche.
- 5) Forme, processi e depositi crionivali.
- 6) Forme e prodotti di alterazione meteorica.
- 7) Forme antropiche.

Ad essi sono stati aggiunti i dati litologici, idrografici e topografici.

Le ricerche svolte non hanno apportato sostanziali modifiche alle conoscenze geologiche dell'area.

Le formazioni litostratigrafiche sono state raggruppate in unità sia per le affinità litologiche sia per il comportamento morfologico generale:

- 1) Formazioni arenacee (Macigno)
  - 2) Formazioni calcaree stratificate (Formazione della Pania di Corfino, Rosso Ammonitico, Calcare Selcifero di Limano, Calcare Selcifero della Val di Lima, Maiolica, Calcareniti di Dudda, Calcareniti di Montegrossi).
  - 3) Formazioni calcaree massicce (Calcare Massiccio).
  - 4) Formazioni marnose (Marne a Posidonia).
  - 5) Litofacies argillitiche (Argilliti di Brolio).
  - 6) Diaspri.
  - 7) Breccie (Breccie di Casoli, Breccie di Balzo Lezza Trugura).
- A questi vanno aggiunte 4 unità litologiche corrispondenti ad altrettante tipologie di detrito:
- 8) Depositi di frana (antichi e recenti).
  - 9) Depositi eluviali e colluviali.
  - 10) Detriti di falda e coni.
  - 11) Depositi alluvionali.

L'area presenta caratteri morfologici dati da rilievi elevati e valli molto incise con dislivelli notevoli che conferiscono al territorio un carattere geografico peculiare. La quota più bassa è data dalla confluenza del Rio della Sega nel Torrente Scesta all'estremità Sud-Est dell'area (350 m); in direzione NNW si raggiunge la quota di 1940 m (Alpe Tre Potenze) in soli 7 Km. L'orografia del territorio presenta un aspetto particolarmente tormentato: alla notevole altimetria e alla variabilità di esposizione dei versanti, si deve aggiungere una successione di contrasti morfologici: aree molto incise con pareti subverticali, impostate soprattutto nelle formazioni calcaree, si alternano ad aree con minore acclività di diversa origine, quasi a simulare altopiani (Albereta, 1000m; Foce al Lago, 1103 m; Serini-Campore, 1000 m).

La morfologia del territorio è largamente influenzata dall'assetto tettonico-strutturale delle formazioni affioranti. Nel settore meridionale, ad esempio, l'area ribassata della Guezza, di Serini e di Campore rappresenta un graben situato tra i due horst del Monte Mosca e del Monte Prato Fiorito, causato dalla Faglia di Limano a Sud e dalla Faglia della Foggetta a Nord. Sono presenti inoltre superfici strutturali (Campore) cuestas (Foce della Rafanella, Metato Carpini), dorsali anticlinali e valli sinclinali, allineamenti di selle originate da faglie (Rio Trafossi).

Anche l'idrografia presenta un notevole adattamento alla struttura. Questo è evidente soprattutto nel canyon dell'Orrido di Botri e nella Valle dello Scesta con una successione di quattro gomiti fluviali di chiara origine strutturale. Oltre a questi caratteri, l'elemento caratterizzante l'area è dato dalle forme di erosione torrentizia che, in buona parte, risultano in attivo approfondimento come è dimostrato dalla relativa scarsità di depositi alluvionali attuali (0,4 km<sup>2</sup>). Le incisioni fluviali, derivanti dai normali fenomeni erosivi, sono state accentuate dai rapidi sollevamenti recenti che hanno interessato la dorsale appenninica e sono ben marcate sia alle quote più alte, in vicinanza del crinale appenninico, sia alle quote più basse. L'aspetto più appariscente dei fenomeni ero-

sivi è dato senza dubbio dall'Orrido di Botri, canyon fluvio-carsico che scorre tra i terreni mesozoici calcarei per circa 3 km. L'evidente gomito fluviale che interessa questo sistema erosivo è probabilmente dovuto a motivi strutturali come già era stato riconosciuto da Masini (1932).

I depositi alluvionali sono costituiti quasi esclusivamente da elementi arenacei del Macigno. Si tratta di depositi grossolani eterometrici presenti soprattutto nel Fegana (Ponte a Gaio) e nello Scesta. Sono stati cartografati inoltre lembi di alluvioni grossolane antiche (zona del M. Torre, Colle a Palmi e Metato Carpini) situati in posizione elevata sul fondovalle. Questi depositi, considerati in un primo tempo morrenici da Masini (1926), furono successivamente attribuiti dallo stesso autore a processi fluviali e sono da ritenersi conseguenza di soste nei processi di approfondimento (Mancini, 1958).

Le quote relativamente alte raggiunte in prossimità del crinale appenninico, insieme con le notevoli escursioni termiche diurne e stagionali, hanno favorito la presenza di processi morfogenetici legati all'azione del gelo discontinuo e della neve. Questi fenomeni, favoriti anche dal taglio del bosco, attività largamente praticata nei decenni scorsi, forniscono materiale grossolano al ruscigliamento e al trasporto fluviale vero e proprio ed hanno interessato in particolar modo la formazione arenacea del Macigno sia perché affiorante alle quote più alte, denudate dalla copertura boschiva, sia per la sua notevole fratturazione che ha favorito l'azione disgregatrice del ghiaccio.

#### FENOMENI FRANOSI

Tra i fenomeni di versante dovuti alla gravità le frane costituiscono senza dubbio le forme più significative. Sono state cartografate 64 frane di dimensioni variabili. Sono presenti infatti dissesti di dimensione metrica e frane di estensione areale chilometrica (Tab. 1). L'area occupata complessivamente dagli accumuli di frana è di circa 6 km<sup>2</sup> (pari al 18,7% dell'area complessiva).

I dissesti si presentano per la maggior parte come corpi isolati. I movimenti principali hanno dimensioni minime dell'ordine di alcune decine di metri e possono superare il chilometro di larghezza e/o lunghezza con un'area che raggiunge, in un caso, il chilometro quadrato (Albereta). Sono classificabili, per la maggior parte, come scorrimenti rotazionali e, in alcuni casi, come movimenti complessi di tipo scorrimento-colata. Gli scorrimenti presentano un rapporto lunghezza-larghezza vicino ad 1 mentre i movimenti complessi hanno forma più stretta ed allungata (Foce al Lago). Questi dissesti sono diffusi in particolare modo nel Macigno, nelle Marne a Posidonia e nelle Argilliti di Brolio.

L'area caratterizzata da fenomeni franosi di dimensioni più elevate è quella di Albereta-Foce al Lago nel versante sinistro del Fegana. Si tratta di un'area in cui sono presenti tre frane antiche di notevole estensione, adiacenti l'una rispetto all'altra, che si

Tab. 1 - Caratteri morfometrici dei principali movimenti franosi.

Frana	Lunghezza	Larghezza media	Area (m <sup>2</sup> )	Sviluppo lineare nicchia (m)	Quota distacco
Albereta	1577	860	1002730	?	?
Foce al lago	1830	490	983710	860	1150
Siviglioli	1180	650	776090	1175	1300
Rio Bormia	1500	350	578170	?	?
Bendormi	606	370	213450	650	1500
Campore	580	430	205189	655	950
Montefegatesi	950	200	202194	575	750
Luggiana	650	350	188910	795	1230
M. Torre	370	430	183260	755	1050
M. Mustioso	510	400	175180	420	1000
Colle a Palmi	380	295	116210	790	900

sono distaccate dal crinale arenaceo della Guezza arrivando ad interessare il fondovalle.

I movimenti superficiali sono classificabili come scorrimenti traslativi e rotazionali e, subordinatamente, come colate di terra. Si tratta di fenomeni limitati in estensione e spessore, talora non cartografabili alla scala del lavoro eseguito. Questi dissesti, presenti anche sui corpi di frana più antichi, interessano soprattutto le coperture detritiche eluviali e colluviali che raggiungono talvolta uno spessore significativo. Tali coperture, derivanti dall'alterazione del substrato, sono particolarmente rilevanti sulla formazione arenacea del Macigno.

Sono state cartografate anche frane di crollo, che interessano perlopiù le formazioni calcaree con versanti più acclivi (Maiolica, Calcareniti) e, in modo più limitato, il Macigno. Sono forme spesso limitate in estensione e frequenti lungo le aste fluviali a causa di processi erosivi di sponda. Anche i detriti di coni o falde alla base dei versanti calcarei possono raggiungere angoli di riposo molto elevati ed essere coinvolti in frane di crollo.

Le frane cartografate sono per la maggior parte da considerarsi quiescenti. Si tratta di fenomeni la cui morfologia è stata in parte rimodellata dagli agenti esogeni e che, spesso, presentano un drenaggio regolare. Sono presenti tuttavia corpi di frana interessati da riattivazioni locali, soprattutto in corrispondenza dei fondovalle, a causa della erosione di sponda dei corsi d'acqua. Altri corpi di frana, di dimensioni anche notevoli (Albereta, Siviglioli), presentano localmente segni di relativa freschezza come trincee, gradini di frana, drenaggi superficiali ed irregolari, contropendenze che fanno pensare a riattivazioni generalizzate dell'accumulo franoso in tempi relativamente recenti. La mancanza di notizie storiche precise e la scarsa presenza antropica sul territorio hanno fatto sì che non si abbiano a disposizione informazioni di ordine cronologico sui dissesti presenti. In ogni caso, i fenomeni di erosione dei corsi d'acqua, le notevoli precipitazioni che interessano questa parte di Appennino e la frequenza di scosse sismiche escludono una classificazione di questi dissesti tra le forme inattive.

## IL SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO (GRASS)

Il GIS utilizzato è la versione 4.1 di GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), un programma di pubblico dominio sviluppato dall'USACERL (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories) e operante sotto sistemi operativi di tipo UNIX, sia su workstation che su PC. Nel presente lavoro GRASS è stato utilizzato su un Personal Computer con sistema operativo LINUX (kernel 2.0.29). I programmi ed una dettagliata documentazione sono reperibili sulla rete Internet (AA.VV., 1993; AA.VV., 1994; Jochen, 1994; Neidig *et al.*, 1991; Parks, 1991; Shapiro *et al.*, 1993).

I dati di base utilizzati nelle elaborazioni sono stati acquisiti sia in forma già digitalizzata, sia attraverso scanner. In particolare, è stata utilizzata la cartografia numerica digitale della Regione Toscana (Sezioni CTR 1:10000) per quanto riguarda i dati altimetrici e l'idrografia. L'affidabilità di questi dati si è rivelata, tuttavia, non elevata: solo alcuni settori dell'area sono infatti coperti da isoipse minori (equidistanza 10 m), mentre la parte rimanente è coperta solamente dalle isoipse direttrici (equidistanza 50 m). Questo ha comportato, per la frequente interruzione delle isoipse minori, dei problemi al contorno nell'elaborazione del DEM (Digital Elevation Model). Gli altri dati di base utilizzati (litologia, elementi tettonico-strutturali, uso del suolo, nicchie di frana) sono stati acquisiti con scanner. Questi dati sono stati vettorializzati e successivamente trasformati in formato raster mediante apposite funzioni di GRASS. Il processo di rasterizzazione prevede la scelta della risoluzione, vale a dire delle dimensioni delle celle della griglia in cui suddividere l'area. È stato valutato che una dimensione delle celle di 5 metri offra una precisione ed un dettaglio sufficienti agli scopi del lavoro, richiedendo tempi di elaborazione contenuti (Clerici e Dall'Olio, 1995; Clerici *et al.*, 1996).

## L'ANALISI CONDIZIONALE

Nell'area oggetto di studio la tipologia di dissesto di

gran lunga predominante è senza dubbio quella franosa dato che altri fenomeni, come trasporto in massa e ruscellamento superficiale, pur essendo presenti, sono di limitata estensione. La valutazione della stabilità dei versanti coincide quindi con lo studio dei fenomeni franosi. Va notato come questa coincidenza sia puramente casuale data la grande influenza sulla instabilità esercitata in altre aree dai fenomeni precedentemente citati.

Il metodo utilizzato per la realizzazione della Carta di Stabilità è basato sulle relazioni statistiche tra alcuni fattori geo-ambientali (variabili) ed il verificarsi delle frane. La tecnica utilizzata è l'Analisi Condizionale (Carrara *et al.*, 1995; van Westen, 1993; Yin e Yan, 1988); la sua applicazione è concettualmente semplice e può essere facilmente associata ad una suddivisione dell'area oggetto di studio in unità di terreno chiamate Unità di Condizioni Uniche (UCU, Unique-Conditions Units).

Sono stati innanzitutto scelti alcuni fattori di instabilità ognuno dei quali suddiviso in classi significative rappresentate su un'unica carta tematica. La sovrapposizione sequenziale di tutti i tematismi genera dei domini omogenei (condizioni uniche) caratterizzati da combinazioni uniche delle classi prese in considerazione (Chung *et al.*, 1995); ad esempio, un particolare dominio potrà essere caratterizzato da una litologia calcarea, una acclività maggiore del 20%, un'attività di pastorizia. Ovviamente, ognuna di queste combinazioni uniche potrà essere rappresentata in diversi settori della regione oggetto di studio. Il numero, le dimensioni e la natura di questi domini è strettamente dipendente dal criterio usato nel classificare i fattori di input.

I fattori (variabili) presi in considerazione per stabilire la loro influenza relativa sulla stabilità dei versanti sono:

- 1) Litologia (10 classi).
- 2) Rapporti tra giacitura degli strati e versanti (3 classi).
- 3) Acclività (3 classi).
- 4) Lunghezza del versante (3 classi).
- 5) Posizione relativa sul versante (3 classi).
- 6) Uso del suolo (3 classi).

Per ognuno di essi sono state scelte delle classi significative i cui limiti sono stati definiti in base all'analisi dei valori di un parametro chiamato Densità di Dissesto e definito da:

$$\text{Densità di Dissesto (m/Km}^2\text{) di una classe} = \frac{\text{Estensione lineare degli orli di nicchia di frana della classe}}{\text{Superficie della classe.}}$$

In sintesi tale scelta consiste nella ricerca iterativa, all'interno di ogni fattore, di classi discriminanti per la loro influenza sulla stabilità dei versanti caratterizzate da una differenziazione nei valori di Densità di Dissesto. Tale analisi, effettuata attraverso l'intersezione della Carta degli orli di nicchia di frana con ognuno dei tematismi realizzati, rappresenta un tentativo di limitare il numero delle classi, diminuendo conseguentemente il numero delle Unità di

Condizioni Uniche, evitando tuttavia di accorpare classi con caratteristiche intrinseche diverse. Si tratta di un approccio univariato al problema che rappresenta probabilmente, come sarà discusso in seguito, il passo più soggettivo dell'intera procedura. La scelta di considerare l'estensione lineare degli orli di nicchia di frana (in luogo dell'estensione areale delle frane) deriva dal presupposto che le nicchie di frana rappresentano l'elemento di dissesto che più si avvicina alle condizioni morfologiche e geologiche in cui si è sviluppato un fenomeno franoso. Frequenti, infatti, sono i casi in cui i corpi di frana composti da una determinata litologia e distaccati, ad esempio, in particolari condizioni di giacitura degli strati e di acclività, si accumulano più a valle in settori con caratteri profondamente diversi. Le nicchie di frana sono inoltre indicative, con il loro sviluppo lineare, dell'ampiezza sul versante del movimento franoso e sono da considerarsi di ubicazione meno soggettiva dei corpi di frana soprattutto in un territorio, come quello in esame, in cui i fenomeni erosivi sui fondovalle hanno profondamente modificato la morfologia degli accumuli franosi.

Le nicchie di frana dei dissesti cartografati sono, inoltre, distintamente riconoscibili. Nei casi in cui non è stato possibile cartografare con certezza questo elemento, sia per le dimensioni ridotte delle frane, sia per l'azione degli agenti esogeni che hanno rimodellato il versante, le frane in questione non sono state prese in considerazione. In particolare, dei 64 dissesti cartografati, ne sono entrati nel calcolo 54 (84,4% del totale). Si è ritenuto corretto questo approccio per evitare di falsare i dati con misurazioni approssimative o prive di fondamento, considerando comunque che i dissesti utilizzati, data la loro alta percentuale rispetto al numero complessivo, sono da ritenersi rappresentativi.

Infine, poiché oltre il 90% dei fenomeni franosi cartografati sono rappresentati da frane di scorrimento quiescenti, non si è ritenuto opportuno suddividere le frane per tipologia o stato di attività. I dissesti sono stati quindi raggruppati in una singola popolazione.

### Cartografia tematica

L'analisi delle 6 variabili di instabilità precedentemente elencate ha portato alla redazione di altrettanti elaborati tematici:

#### 1) Carta litologica (Fig. 1)

Questo tematismo deriva dalla digitalizzazione, tramite scanner, dei confini tra le diverse unità litologiche presenti nella Carta geomorfologica.

Nella Tabella 2 sono rappresentati i dati di estensione areale e di Densità di Dissesto per ognuna delle classi litologiche considerate. Si può notare come i depositi di frana occupino quasi un quinto del territorio mentre la classe litologica con maggiore copertura è quella dei calcari stratificati (32,31 %) seguita dalla formazione arenacea del Macigno (26,86%). Da notare, inoltre, la buona copertura dei depositi eluviali e colluviali (7,18%) e la relativa scarsità di

# CARTA LITOLOGICA

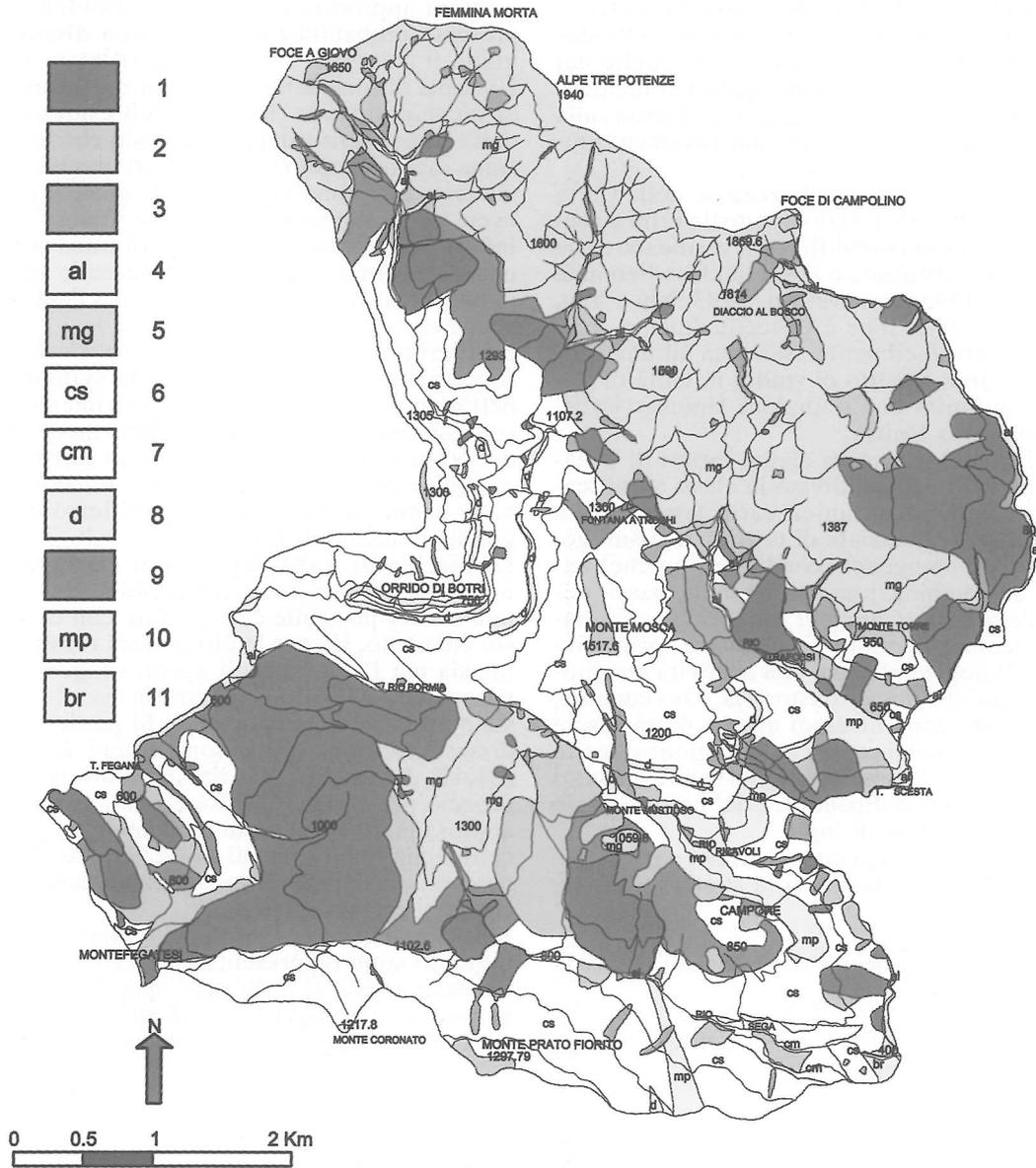


Fig. 1 - 1) Depositi di frana (attivi e quiescenti). 2) Depositi eluviali e colluviali. 3) Depositi di falda e coni (detritici, debris flows, di valanga). 4) Depositi alluvionali (recenti ed antichi). 5) Formazioni arenacee (Macigno). 6) Formazioni calcaree stratificate (Formazione della Pania di Corfino, Rosso Ammonitico, Calcare Selcifero di Limano, Calcare Selcifero della Val di Lima, Maiolica, Calcareniti di Dudda, Calcareniti di Montegrossi). 7) Formazioni calcaree massicce (Calcare Massiccio). 8) Diaspri. 9) Litofacies argillitiche (Argilliti di Brolio). 10) Formazioni marnose (Marne a Posidonia). 11) Breccie (Breccie di Casoli, Breccie di Balzo Lezza Trugura).

depositi alluvionali (1,21%). L'unità litologica delle breccie è stata considerata non significativa dal punto di vista statistico (occupa lo 0,14 %) e non sarà presa in esame nelle elaborazioni successive. L'esame delle Densità di Dissesto, infine, mette in evidenza come le Argilliti di Dissesto, e il Macigno siano caratterizzati da una propensione al dissesto particolarmente elevata.

2) *Carta dei rapporti tra giaciture degli strati e versanti* (Fig. 2)

Per la realizzazione di questo elaborato è stata necessaria la creazione di 4 tematismi di base (Clerici *et al.*, 1993):

a) Carta dell'immersione degli strati; b) Carta dell'inclinazione degli strati (durante il rilevamento sono state effettuate 121 misure di strato delle quali sono

Tab. 2 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi litologiche.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
Depositi di frana	6,04	18,68	2415	399,97
Depositi eluviali e colluviali	2,32	7,18	1345	579,49
Detriti di falda e coni	1,40	4,34	135	96,22
Depositi alluvionali	0,39	1,21	0	0
Formazioni arenacee	8,68	26,86	9990	1150,79
Formazioni calcaree stratificate	10,44	32,31	3985	381,60
Formazioni calcaree massicce	0,23	0,72	10	43,10
Diaspri	0,31	0,94	5	16,34
Argilliti di Brolio	1,61	4,99	2560	1586,12
Formazioni marnose	0,85	2,63	590	695,75
Brecce	0,05	0,14	0	0
TOTALE	32,32	100,00	21035	

stati digitalizzati e vettorializzati sia i valori dell'imersione sia quelli dell'inclinazione); c) Carta dell'orientazione dei versanti; d) Carta dell'acclività (questi ultimi due tematismi sono stati ottenuti, attraverso un apposito modulo di GRASS, direttamente dal Modello Altimetrico Digitale).

L'analisi delle Densità di Dissesto di numerose classi rappresentanti configurazioni diverse dei rapporti tra strati e versanti ha rivelato una sostanziale uniformità nelle classi caratterizzate da strati con componente a franapoggio e tra le classi con strati a reggipoggio ed a contropoggio. Sulla base di queste osservazioni, considerando anche che gran parte dell'area è interessata da litologie prive di stratificazione o, comunque, con stratificazione spesso non risolvibile (depositi detritici, Argilliti), sono state considerate solamente 3 classi ai fini del calcolo delle Unità di Condizioni Uniche.

Dall'esame della Tabella 3 si può notare una maggiore Densità di Dissesto nella classe 2 (strati con componente a franapoggio); la differenza con la classe 1, anche se poco elevata, appare comunque significativa.

### 3) Carta dell'acclività (Fig. 3)

La Carta dell'acclività è stata ottenuta dal Modello Altimetrico Digitale (DEM). Anche in questo caso il numero ed i limiti delle classi scelte sono derivate dalla ricerca di classi di pendenza caratterizzate da diversa propensione al dissesto (Tab. 4).

A conferma di quanto precedentemente accennato riguardo la forte acclività che interessa l'area in esame, si può notare come oltre la metà del territorio presenta pendenze superiori al 60%, mentre le pendenze inferiori al 20% occupano appena il 6% dell'area. Per quanto concerne le Densità di Dissesto si nota un incremento abbastanza netto con l'aumento dell'acclività. I tentativi di suddividere ulteriormente la classe centrale (21-60%) non hanno portato alla definizione di intervalli di pendenza significativi dal punto di vista delle differenze nelle Densità di Dissesto.

### 4) Carta della lunghezza dei versanti (Fig. 4)

Per la realizzazione di questo tematismo è stato necessario suddividere l'area in 6 bacini e 4 emibacini attraverso la digitalizzazione delle linee di spartiacque e delle linee di impluvio (Tab. 5). Le dimensioni di questi bacini sono state scelte in relazione alla grandezza media dei dissesti che interessano l'area. Questa suddivisione ha permesso la realizzazione della Carta della distanza dagli spartiacque e della Carta della distanza dai fiumi, la somma delle quali ha portato alla Carta della lunghezza dei versanti.

Sono state scelte 3 classi di lunghezza dei versanti. Dall'esame della Tabella 6 si può notare un chiaro incremento delle Densità di Dissesto con l'aumentare di questa variabile.

### 5) Carta della posizione relativa sui versanti (Fig. 5)

Questo tematismo esprime la posizione di ogni cella in cui è suddivisa l'area rispetto allo spartiacque di un determinato bacino. È stata utilizzata la stessa suddivisione in bacini che ha portato alla creazione della Carta della lunghezza dei versanti. La posizione è espressa con valori da 0 a 1 (0 in vicinanza degli spartiacque, 1 in vicinanza degli impluvi). La carta è stata ottenuta in modo relativamente semplice con un'operazione divisoria tra la Carta della distanza dagli spartiacque e la Carta della lunghezza dei versanti.

I risultati ottenuti dalla suddivisione in 3 classi dei valori di posizione relativa sui versanti sono espressi in Tabella 7. Il dato che emerge dall'esame della tabella è il netto aumento della propensione al dissesto in vicinanza degli spartiacque. Tale relazione è peraltro evidente osservando la distribuzione delle nicchie di frana sulla Carta di Stabilità (Fig. 8).

### 6) Carta dell'uso del suolo (Fig. 6)

L'analisi delle classi di uso del suolo derivate dalla cartografia della Regione Toscana ha permesso di differenziare il bosco ceduo degradato con valori di Densità di Dissesto particolarmente elevati dal bo-

# CARTA DEI RAPPORTI STRATI/VERSANTI

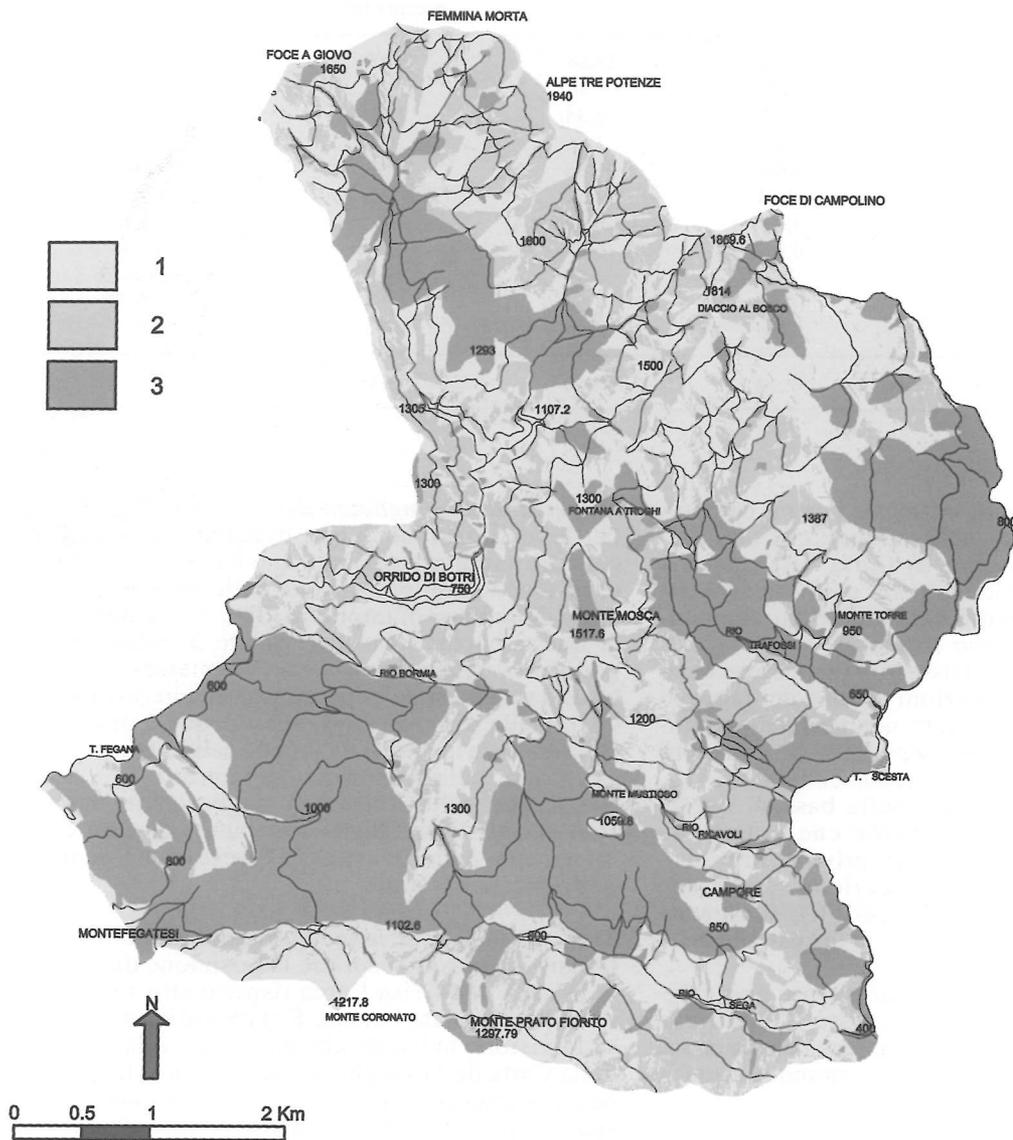


Fig. 2 - 1) Strati con componente a reggipoggio, contropoggio e strati orizzontali. 2) Strati con componente a franapoggio. 3) Litologie prive di stratificazione o con stratificazione non risolvibile.

Tab. 3 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi dei rapporti tra strati e versanti. Classe 1: Strati con componente a reggipoggio, contropoggio e strati orizzontali; classe 2: strati con componente a franapoggio; classe 3: litologie prive di stratificazione o con stratificazione non risolvibile.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
CLASSE 1	11,80	36,51	7600	644,01
CLASSE 2	8,71	26,95	6925	794,97
CLASSE 3	11,81	36,54	6510	551,23
TOTALE	32,32	100,00	21035	

scio ceduo denso mentre le altre classi sono state raggruppate sotto la voce 'altri usi' a causa della loro sostanziale uniformità di valori di Densità di Dissesto (Tab. 8).

Il bosco degradato può apparire, in realtà, un effetto dei fenomeni franosi. Tuttavia, le aree con copertura boschiva ridotta coincidono, in molti casi, con le aree interessate, nei decenni scorsi, dalle opere di disboscamento.

### Sviluppo della metodologia

Attraverso un apposito modulo di GRASS, i 6 tematismi sono stati sovrapposti allo scopo di isolare le

# CARTA CLIVOMETRICA

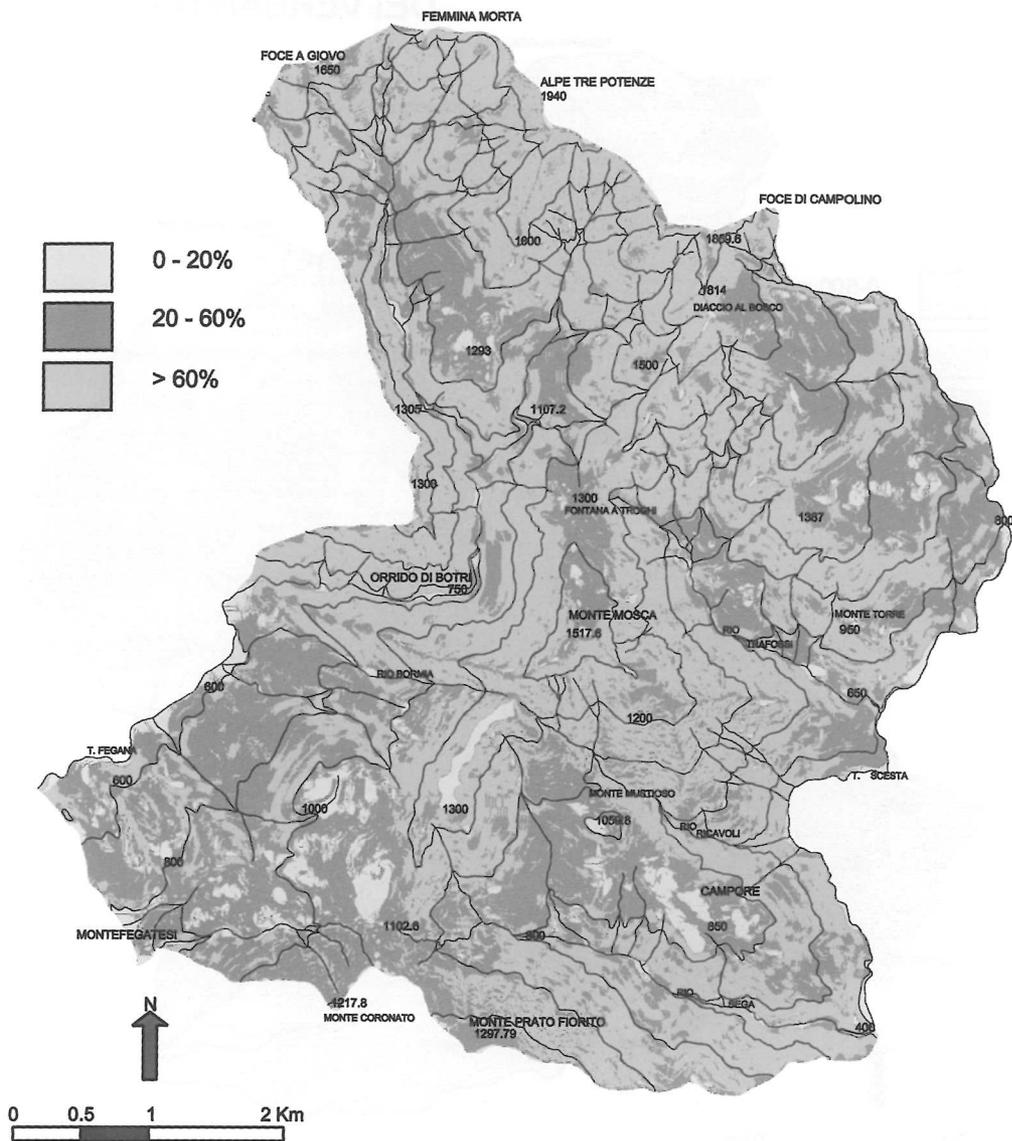


Fig. 3

Tab. 4 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi di acclività.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
0-20%	1,96	6,07	480	244,52
21-60	12,54	38,80	6960	554,98
> 60%	17,82	55,13	13595	762,99
<b>TOTALE</b>	<b>32,32</b>	<b>100,00</b>	<b>21035</b>	

Tab. 5 - Estensione dei bacini e degli embacini (\*) in cui è stata suddivisa l'area.

BACINI	ESTENSIONE (km <sup>2</sup> )
SOLCO GRANDE	4,24
RIO PELAGO	2,47
RIO RIBELLINO	3,17
RIO TRAFOSI	3,88
RIO RICAVOLI	1,76
RIO DELLA SEGA	5,06
TORRENTE FEGANA (alto corso) *	6,44
TORRENTE SCESTA 1 *	3,49
TORRENTE SCESTA 2 *	1,00
TORRENTE SCESTA 3 *	0,81
<b>TOTALE</b>	<b>32,32</b>

## CARTA DELLA LUNGHEZZA DEI VERSANTI

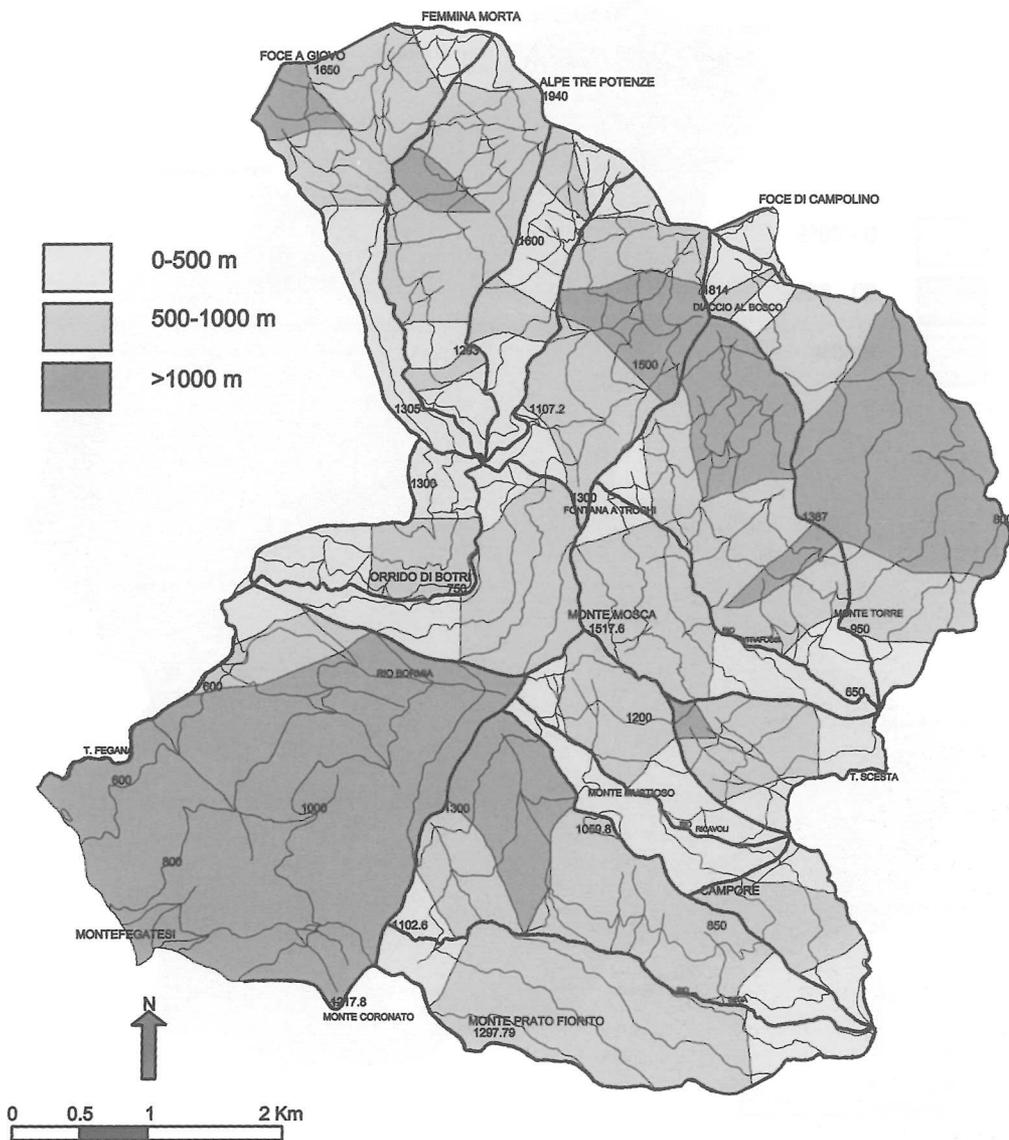


Fig. 4

Tab. 6 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi di lunghezza dei versanti.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
0-500 metri	7,03	21,76	2490	354,10
500-1000 metri	14,19	43,89	8525	600,86
> 1000 metri	11,10	34,35	10020	902,54
<b>TOTALE</b>	<b>32,32</b>	<b>100,00</b>	<b>21035</b>	

Unità di Condizioni Uniche (UCU), vale a dire domini omogenei caratterizzati da combinazioni uniche delle classi prese in esame. La carta risultante da questa sovrapposizione è la Carta delle Unità di Condizioni Uniche, nella quale il numero massimo possibile di domini omogenei è dato dal prodotto del numero delle classi in cui sono state suddivise tutte le variabili:

$$N_{\max} = 10 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 2430.$$

In realtà, le variabili prese in esame sono caratterizzate da numerose interrelazioni spaziali e il numero

## CARTA DELLA POSIZIONE RELATIVA SUI VERSANTI

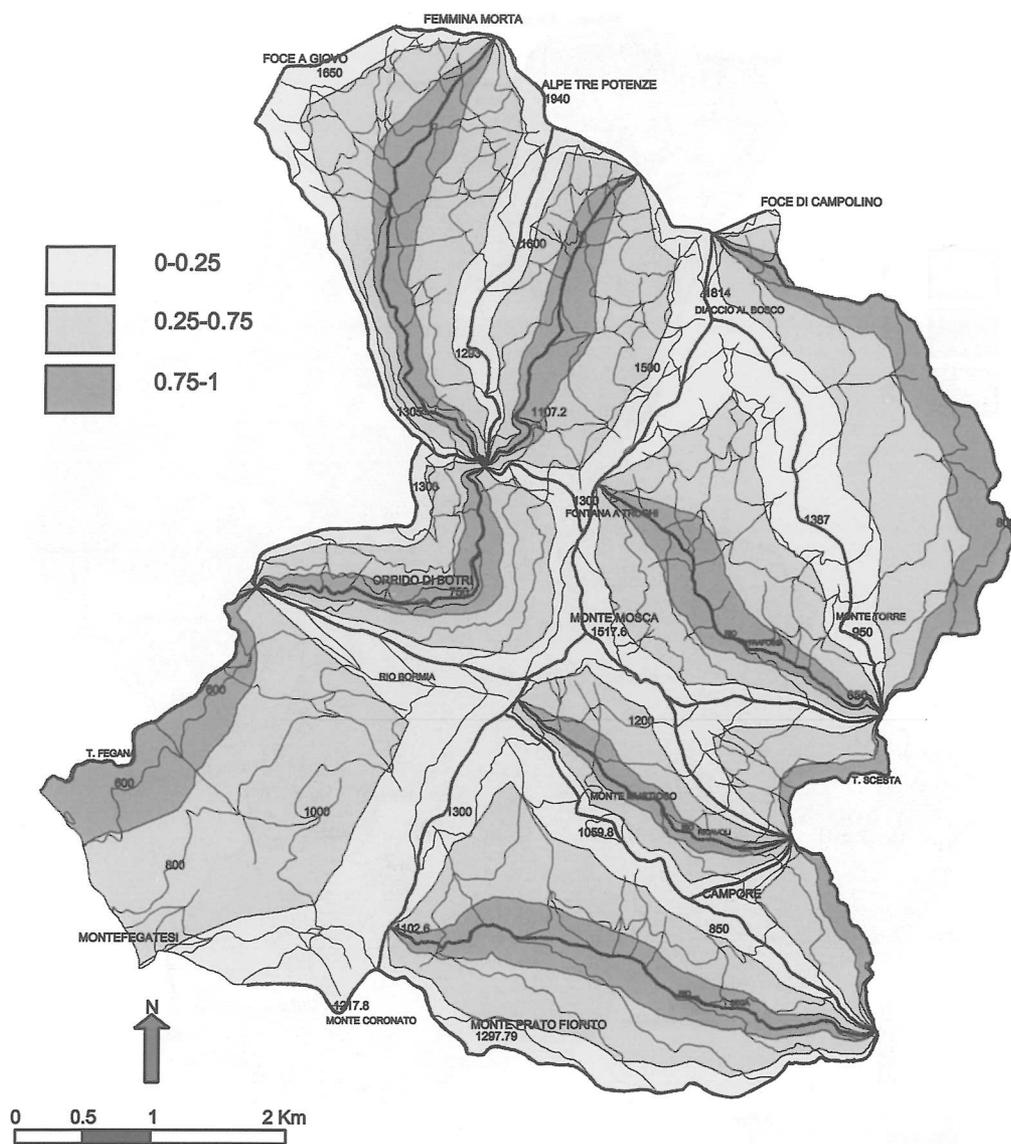


Fig. 5 - Valori prossimi a 0 indicano vicinanza agli spartiacque, valori prossimi ad 1 indicano vicinanza agli impluvi.

Tab. 7 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi di posizione relativa sul versante. Valori prossimi a 0 indicano vicinanza agli spartiacque, valori prossimi ad 1 indicano vicinanza agli impluvi.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
0-0.25	10,24	31,68	8180	798,75
0.25-0.75	15,54	48,07	9850	633,97
0.75-1	6,54	20,25	3005	459,20
TOTALE	32,32	100,00	21035	

di UCU risultante dalla sovrapposizione dei 6 tematismi è notevolmente inferiore. In particolare, sono state rilevate 906 Unità di Condizioni Uniche ognuna delle quali è caratterizzata da una certa estensione areale e può essere presente in settori non contigui dell'area in esame.

Attraverso una routine creata appositamente, la Carta delle UCU è stata intersecata con la Carta degli orli di nicchia di frana ed è stata calcolata la Densità di Dissesto di ogni UCU. Questo valore rappresenta la frequenza di frana di ogni UCU ( $f$ ) e, per il Teorema di Bayes (Morgan, 1968), è assimilabile alla probabilità del verificarsi delle frane ( $P$ ):

# CARTA DELL'USO DEL SUOLO

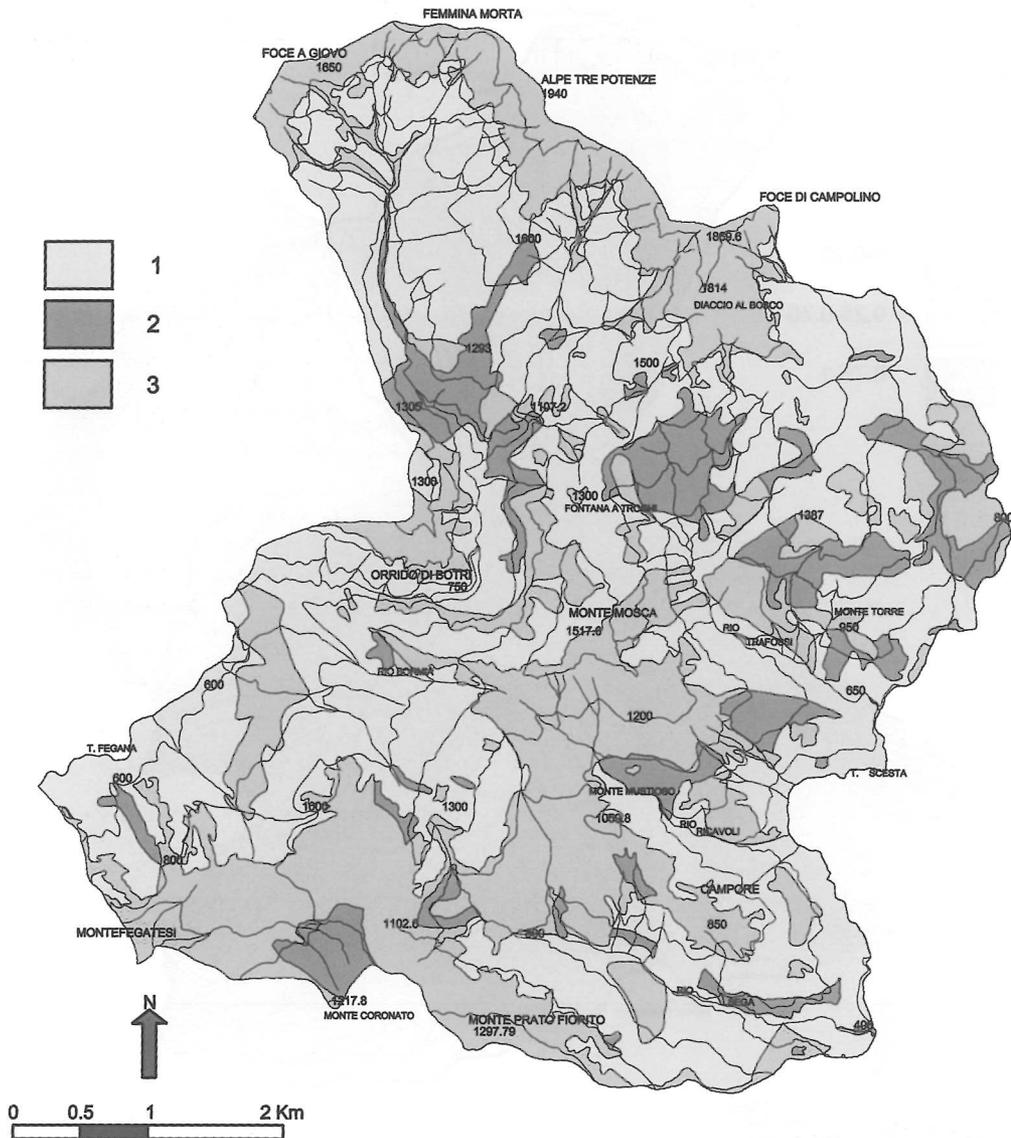


Fig. 6 - 1) Bosco ceduo denso (copertura > 60%); 2) Bosco ceduo degradato (copertura < 60%); 3) Altri usi.

Tab. 8 - Estensione areale e Densità di Dissesto delle classi di uso del suolo.

Classi	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%	Sviluppo lineare nicchia (m)	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )
Bosco ceduo denso (copertura > 60%)	17,11	52,95	10985	641,80
Bosco ceduo degrad. (copertura < 60%)	3,49	10,80	4445	1273,64
Altri usi	11,72	36,25	5605	478,41
<b>TOTALE</b>	<b>32,32</b>	<b>100,00</b>	<b>21035</b>	

$$f = P = \frac{\text{Densità di Dissesto (m/Km}^2\text{) di una UCU} \times \text{Estensione lineare degli orli di nicchia di frana nell'UCU}}{\text{Superficie UCU}}$$

Da notare che solo 197 delle 906 UCU rilevate sono interessate da nicchie di distacco: le restanti hanno, ovviamente, Densità di Dissesto nulla. È stata successivamente calcolata la Densità di Dissesto Media sull'intero territorio (Probabilità media di dissesto,  $P_{media}$ ):

$$P_{media} = \frac{\text{Densità di Dissesto Media (m/km}^2\text{)} \times \text{Estensione lineare totale degli orli di nicchia di frana}}{\text{Superficie totale del territorio in esame} = 21035/32,322 = 650,75 \text{ m/km}^2}$$

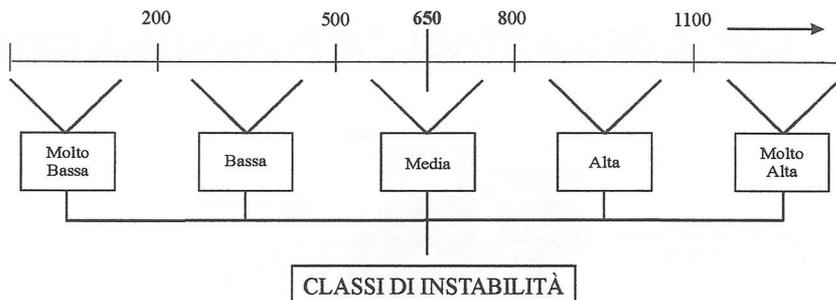


Fig. 7 - Suddivisione in classi di instabilità. I valori sono espressi in metri lineari di nicchia di distacco su chilometri quadrati.

I domini con valori di Densità di Dissesto più alti o più bassi della Densità Media rappresentano configurazioni geologico-geomorfologiche che esercitano, rispettivamente, una influenza negativa o positiva sulle condizioni di instabilità del territorio. I valori di Densità di Dissesto di ogni UCU sono stati successivamente suddivisi in 5 classi di instabilità crescente i cui limiti sono centrati sul valore della Densità di Dissesto Media (Fig. 7).

L'esame della Tabella 9 mette in evidenza che le classi maggiormente rappresentate sul territorio sono quelle ad instabilità molto alta e molto bassa.

Tab. 9 - Estensione areale delle classi di instabilità.

Classe di instabilità	Densità di Dissesto (m/Km <sup>2</sup> )	Estensione (Km <sup>2</sup> )	%
Molto bassa	0-200	15,93	49,31
Bassa	200-500	4,86	15,03
Media	500-800	2,24	6,91
Alta	800-1100	2,19	6,79
Molto alta	> 1100	7,10	21,96
TOTALE		32,32	100,00

La suddivisione del territorio in 5 classi di instabilità è puramente indicativa e serve solo a creare una maggiore articolazione nei valori di Densità di Dissesto delle Unità di Condizioni Uniche. Questi ultimi coprono, infatti, un ampio intervallo (da 0 a oltre 1500 m/km<sup>2</sup>). La rappresentazione cartografica della Tabella 9 è la Carta della Stabilità Potenziale dei Versanti (Fig. 8).

Poiché in tale carta sono presenti numerosi settori con estensione areale molto piccola che possono riflettere errori nella digitalizzazione dei dati, è stata eseguita un'operazione di filtraggio (realizzata attraverso un algoritmo appositamente creato) con la quale a tutti i cluster con superficie più piccola di un dato valore soglia (meno di 8 celle, 200 m<sup>2</sup>) è stato assegnato il valore dei pixels adiacenti appartenenti ad un cluster avente area totale maggiore del valore di soglia. Questa scelta, pur essendo discutibile poiché

introduce un fattore di soggettività, ha lo scopo di facilitare la visualizzazione dell'elaborato finale. Date le dimensioni molto piccole dei clusters eliminati rispetto alla scala del lavoro eseguito questa operazione di filtraggio non appare, d'altra parte, concettualmente sbagliata.

#### CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'osservazione dell'elaborato finale permette alcune considerazioni sull'affidabilità del metodo applicato.

Possiamo notare innanzitutto la distribuzione delle nicchie di distacco: la maggior parte di esse rientrano nella classe caratterizzata da instabilità molto alta mentre un numero progressivamente minore di dissesti interessa le classi con grado di instabilità inferiore.

Una situazione di incertezza si riscontra in Val Fegana, nel versante esposto a Nord-Ovest del rilievo arenaceo della Guezza. Da questo settore si sono distaccate le principali frane dell'area (Albereta, Rio Bormia). Le nicchie di distacco di queste frane non sono chiaramente visibili e, per quanto detto in precedenza, non sono state prese in considerazione nella metodologia di realizzazione della Carta di Stabilità. È stata effettuata, d'altra parte, la valutazione della stabilità di questo settore senza considerare i dissesti. I risultati conseguiti possono essere visti come una verifica della capacità predittiva del metodo utilizzato. Osservando la Carta di Stabilità Potenziale, possiamo notare che la zona in questione è caratterizzata da una grande varietà di classi di instabilità. Tuttavia, le classi più rappresentate sono quelle di instabilità media, alta e molto alta. Le configurazioni geologico-geomorfologiche presenti in quest'area sono state, quindi, giudicate sostanzialmente instabili sulla base della propensione al dissesto di configurazioni simili nella restante parte del territorio. Le potenzialità dell'Analisi Condizionale possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- 1) I risultati riflettono le interrelazioni tra i fattori dell'instabilità;
- 2) La sua semplicità concettuale permette la comprensione delle fasi della procedura anche a soggetti non introdotti nel settore.
- 3) Può essere applicata in quelle situazioni dove è

## CARTA DELLA STABILITA' POTENZIALE DEI VERSANTI

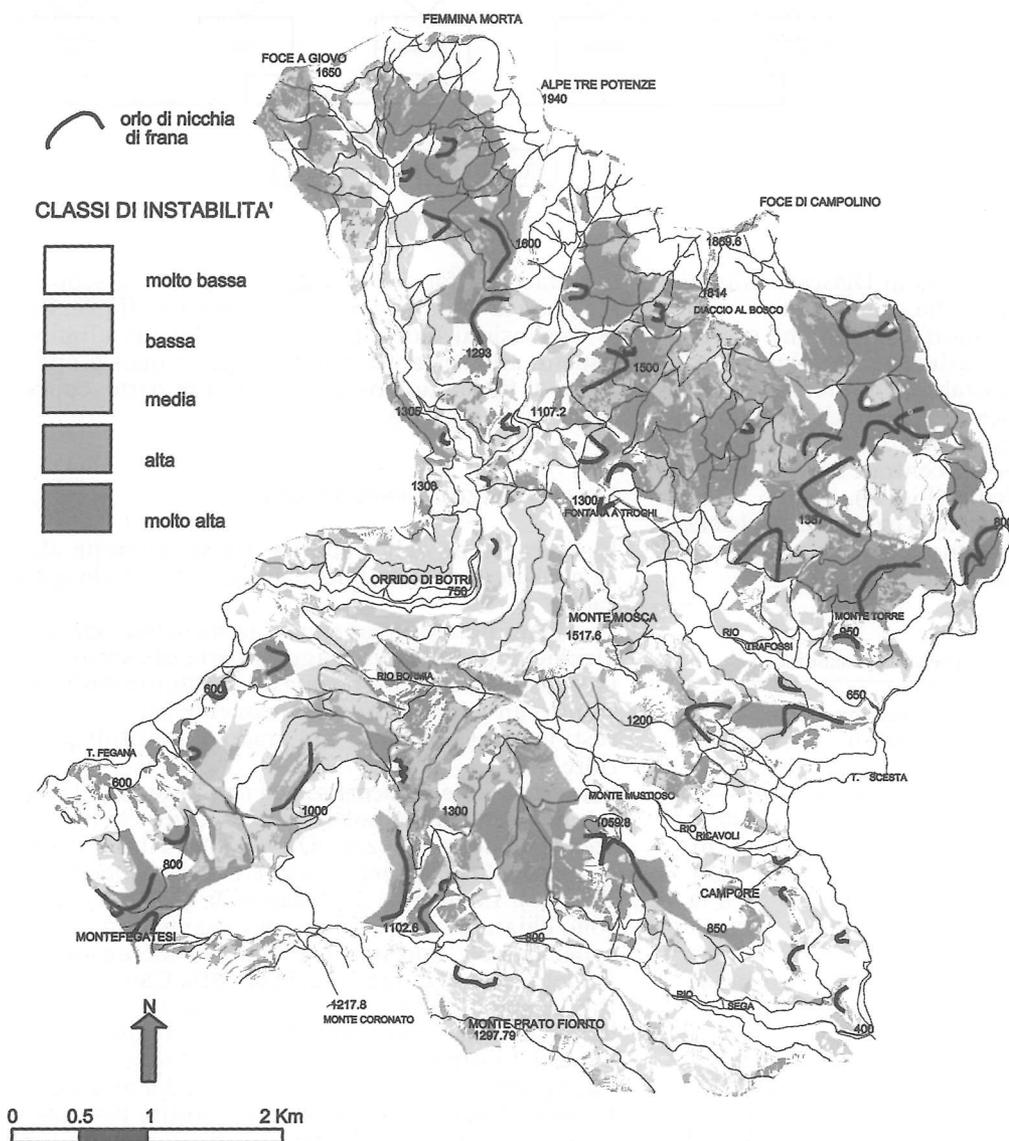


Fig. 8

concettualmente od operazionalmente difficile o impossibile predefinire una unità di terreno basata fisicamente (Carrara *et al.*, 1995);

4) Le fasi della procedura si integrano perfettamente con gli strumenti del Sistema Informativo Geografico che consente un'agevole e veloce elaborazione dei dati, pur mantenendo elevati livelli di precisione. I punti deboli sono invece da ricercarsi nella scelta iniziale dei fattori e del numero delle classi in cui suddividerli (queste ultime derivano dalla verifica univariata delle relazioni tra i singoli fattori ed i dissesti) e nel grande numero di Unità di Condizioni Uniche che si genera quando vengono sovrapposti i

vari tematismi: la scelta delle classi deve tenere presente la necessità di limitare tale numero. Un'altra limitazione riguarda la sensibilità agli errori di digitalizzazione testimoniata dalla presenza di piccoli domini statisticamente non significativi nella Carta delle Unità di Condizioni Uniche.

Questi limiti, peraltro già riconosciuti in letteratura, possono essere superati con le metodologie statistiche multivariate (Regressione Logistica e Analisi Discriminante) che hanno focalizzato l'attenzione degli studiosi negli ultimi anni (Carrara *et al.*, 1991, 1995; Clerici e Dall'Olio, 1995; Guzzetti, 1993, 1996); tali metodologie, tuttavia, in presenza simultanea di varia-

bili continue e categoriche non conducono generalmente a risultati ottimali e, inoltre, hanno bisogno di un numero elevato di dissesti e, soprattutto, di una popolazione omogeneamente distribuita di questi ultimi su un territorio sufficientemente vasto, assunzioni frequentemente violate nelle applicazioni pratiche (Carrara *et al.*, 1995; Clerici e Dall'Olio, 1995).

Un punto su cui vale la pena soffermarsi riguarda la lettura della Carta di Stabilità Potenziale. Gli operatori dovrebbero valutare, sulla base dell'appartenenza di un certo settore del territorio ad una data classe di instabilità sia il dato della Densità di Dissesto, che può cadere a cavallo di due classi di instabilità, sia le situazioni locali geologiche e geomorfologiche che potrebbero essere utili per definire meglio la stabilità di una certa area. Quest'ultima valutazione si rivela particolarmente importante nei casi in cui aree interessate da movimenti franosi sono giudicate stabili, mettendo quindi in evidenza situazioni anomale.

A questo proposito viene ad essere necessario l'esame della Carta geomorfologica ed il confronto di quest'ultima con la Carta di Stabilità Potenziale. Il dato geomorfologico può essere utile sia come controllo sia come inserimento di nuovi dati non utilizzati nella metodologia di realizzazione della Carta di Stabilità. Tale confronto non toglie dignità all'elaborato finale ma, anzi, lo avvalorava della esperienza dell'operatore senza la necessità di attribuire a quest'ultimo considerazioni eccessivamente soggettive. La Carta geomorfologica, quindi, indispensabile strumento iniziale per la raccolta dei dati, torna ad essere analizzata nelle fasi finali della valutazione della stabilità dei versanti.

#### RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. A. Clerici dell'Istituto di Geologia dell'Università di Parma per il fondamentale aiuto nella stesura delle sezioni metodologiche ed informatiche e il Prof. P.R. Federici del Dipartimento di Scienza della Terra dell'Università di Pisa per il costante interesse dimostrato verso questo lavoro e per i suoi preziosi consigli.

#### BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 1993. GRASS 4.0 Beginner's manual. <http://www.bham.ac.uk/BUFAU/Staff/Vanleupm/mantxt03.htm>.
- AA.VV., 1994. GRASS 4.1 User's Reference Manual. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, <ftp://moon.cecer.army.mil/grass/>.
- Baldacci, F., Cerrina Ferroni, A. e Plesi, G., 1981. Una nuova interpretazione della struttura della Val di Lima. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem. (Ser. A)*, 88: 159-168.
- Bellincioni, D., Fancelli, R., Ghelardoni, R. e Trevisan, L., 1956. Grande piega coricata con nucleo triassico in Val di Lima. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem. (Ser. A)*, 63: 71-77.
- Bellincioni, P., 1959. Il nucleo mesozoico della Val di Lima (Appennino lucchese). *Boll. Soc. geol. it.*, 78 (2): 44-73.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. e Reichenbach, P., 1991. Gis techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, P. e Reichenbach, P., 1995. Gis-based techniques for mapping landslide hazard. In «Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards», Academic Pub., Dordrecht, the Netherlands.
- Chung, Ch. F., Fabbri, A.G. e van Westen, C.J., 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In «Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards», Kluwer Pub., Dordrecht, the Netherlands.
- Clerici, A., Cuccuru, G., Trambaglio, L. e Lina, F., 1993. La realizzazione di una carta della stabilità dei versanti mediante l'uso di un sistema d'informazione geografica. *Geol. tec. e amb.*, 4: 25-40.
- Clerici, A. e Dall'Olio, N., 1995. La realizzazione di una Carta della stabilità potenziale dei versanti mediante tecniche di Analisi Statistica Multivariata e un Sistema d'Informazione Geografica. *Geol. tec. e amb.*, 4: 49-57.
- Clerici, A., Perego, S., Giudice, G. e Ricciardelli, M., 1996. La formazione di un lago di sbarramento da frana: simulazione mediante un Sistema Informativo Geografico. *Geol. tec. e amb.*, 1: 51-57.
- Fazzuoli, M., Becarelli, S., Burchietti, G., Ferrini, G., Garzonio, C.A., Mannori, G., Sani, F. e Sguazzoni, G., 1992. Geologia del Nucleo Mesozoico della Val di Lima. Appennino Settentrionale. Province di Lucca e Pistoia. Carta geologica in scala 1:25000, Selva, Firenze.
- Fazzuoli, M., Becarelli, S., Burchietti, G., Ferrini, G., Garzonio, C.A., Mannori, G., Sani, F. e Sguazzoni, G., 1994. A short outline of the geology of the mesozoic inlier in the Lima Valley, Northern Apennines. *Mem. Soc. geol. ital.*, 48: 79-85.
- GNGFG - CNR, 1987. Cartografia della pericolosità connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti. *Boll. Soc. geol. it.*, 106: 199-221.
- Guzzetti, F., 1993. Landslide hazard and risk by gis-based multivariate models. In Workshop on «Geographic Information Systems in Assessing Natural Hazards», Perugia, Sett. 93, 83-91.
- Guzzetti, F., 1996. La stima della pericolosità e del rischio da frana nell'area umbro-marchigiana. Piani di Bacino, Provincia di Genova. *Suppl. PG Prof. Geol.*, 12: 71-95.
- Jochen, A., 1994. GRASS Tutorial. [http://bbq.ncgia.ucsb.edu/~jochen/papers/93\\_abst.html](http://bbq.ncgia.ucsb.edu/~jochen/papers/93_abst.html).
- Mancini, F., 1958. I terrazzi quaternari della Val di Lima. *Riv. geogr. it.*, 65: 281-313.
- Masini, R., 1926. Lembi di morene glaciali nella Valle Scesta (Lima) e nella Turrite di Galliciano. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem.*, 37: 55-89.
- Masini, R., 1932. La cupola secondaria di Val di Lima e dell'Orrido di Botri. Ed. Nistri e Lischi, Pisa.
- Morgan, B.W., 1968. An introduction to Bayesian statistical decision process. Ed. Prentice-Hall, New York.
- Neidig, C.A., Gardes, D. e Kos, C., 1991. GRASS 4.0 Map Digitizing Manual: v.digit. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, <ftp://moon.cecer.army.mil/grass/>.
- Parks, J.E., 1991. GRASS 4.0. Introduction to Geographic Information Systems using the Geographical Resources Analysis Support System (GRASS). Center for Advanced Spatial Technologies, University of Arkansas, <ftp://moon.cecer.army.mil/grass/grass4.0/documents/tutorial/parks/>.
- SGN - GNGFG, 1994. Carta Geomorfologica d'Italia (1:50000) - Guida al rilevamento. *Quad. Serv. geol. naz.*, (Ser. III), 4: 1-47.
- Shapiro, M., Westervelt, J., Gerdes, D., Larson, M. e Brownfield, R.K., 1993. GRASS 4.1 Programmer's Manual. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories, Champaign, Illinois, <ftp://moon.cecer.army.mil/grass/>.
- Van Westen, C.J., 1993. Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation. ITC-Publication n. 15, ITC, Enschede.
- Yin, K.L. and Yan, T.Z., 1988. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceed. 5th Int. Symp. Landslides, Lausanne*, 2: 1269-1272.

