

Elaborazione dell'indice SMR mediante *overlay* di carte tematiche: un caso applicativo nella Valle del Serchio (Toscana Nord-Occidentale)

Daria Marchetti¹, Roberto Giannecchini², Francesco Falaschi²

¹Autore corrispondente. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa - Via S. Maria, 53 - 56126 Pisa Tel.050/2215725 Fax.050/2215800 marchettid@dst.unipi.it

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa - rgiannecchini@dst.unipi.it; falaschi@dst.unipi.it

Elaboration of SMR Index by overlay of thematic maps: an applicative example in the Serchio River valley (North-Western Tuscany)

ABSTRACT: This study was carried out after the realization of numerous geomechanical analyses, finalized to the stability analysis of rock walls during a carriageway widening in a mountainous area. With this aim, a cartography based on SMR Index of Romana was realized, through a spatial analysis of both geomechanical parameters and the distribution of the discontinuities. This approach therefore allowed the estimation of the potentially unstable zones for each area and their classification on the basis of the resulting stability degree. Such methodological approach could find an important application above all in scarcely accessible zones, where, however, a good structural homogeneity exists. This methodology was elaborated during geomechanical surveys, aimed at the realization of structural engineering works in the Middle Valley of the Serchio River. The purpose of the study consisted in the determination of the corrected profile of the slope based on the stability conditions of the rock masses and the consequent planning of eventual works as support. The data elaboration allowed the individuation of the most critical areas, prone to sliding or toppling. This study revealed particularly suitable to experimentation, because it regarded a meaningful area with spatially homogenous geological/geomechanical/structural situation. The data obtained, appropriately compared with traditional methods, showed a good degree of reliability.

Key terms: landslide, SMR, GIS, northern Apennine, Tuscany

Termini chiave: frana, SMR, GIS, Appennino Settentrionale, Toscana

Riassunto

Questa ricerca è stata effettuata in seguito alla realizzazione di numerose indagini geomeccaniche, finalizzate all'analisi di stabilità di pareti rocciose. A tal fine, è stata realizzata una cartografia in base all'indice SMR di Romana, tramite un'analisi areale dei parametri geomeccanici e della distribuzione spaziale delle discontinuità: è stato quindi possibile valutare area per area le zone potenzialmente instabili e classificarle in base al grado di stabilità risultante. Tale approccio metodologico può trovare certamente un'importante applicazione anche e soprattutto in zone non facilmente accessibili, laddove si riscontri peraltro una buona omogeneità strutturale. Questa metodologia è stata elaborata in occasione di indagini geomeccaniche condotte per la realizzazione di opere di ingegneria strutturale nella Media Valle del Serchio. La finalità del lavoro consisteva nella determinazione della corretta riprofilatura del versante in base alle condizioni di stabilità degli ammassi rocciosi e la conseguente progettazione di eventuali opere di sostegno. I risultati ottenuti dalla elaborazione dei dati hanno permesso di evidenziare le aree più facilmente soggette a scivolamento planare e ribaltamento. Questo studio si è rilevato particolarmente idoneo alla sperimentazione, in

quanto applicato in un'area significativa caratterizzata da una situazione geologica/geomeccanica/strutturale arealmente omogenea, per cui validamente modellizzabile. I risultati conseguiti, confrontati con metodi di tipo tradizionale ampiamente utilizzate nell'ambito di questi studi, mostrano un buon grado di attendibilità.

Introduzione

Lo studio si è sviluppato in risposta alla necessità di eseguire su un'area relativamente ampia un'analisi di stabilità dei fronti rocciosi. Tale problematica, in un primo tempo, era stata affrontata con il classico approccio del rilevamento geologico-tecnico e dell'analisi dei cunei (test di Markland), attraverso i quali si è valutata la possibilità di cinematismi locali di scivolamento o ribaltamento. La metodologia proposta ha permesso di valutare area per area, e non più per singoli affioramenti, come normalmente viene fatto durante indagini di questo tipo, le zone potenzialmente a rischio di frana, e di classificarle in base alla stabilità. Tale differenza di approccio consente quindi una utilizzazione della metodologia proposta in particolare in aree scarsamente accessibili e dove quindi risulta piuttosto difficoltoso disporre di una maglia di stazioni

geomeccaniche significativamente fitta. L'opportunità di sperimentare tale metodo si è presentata in occasione delle indagini geomeccaniche condotte per verificare la possibilità di ampliamento della carreggiata della S.P. n° 2 Lodovica e per la realizzazione di un ponte sul Fiume Serchio sulla stessa viabilità. Il tratto di strada interessato dagli interventi risulta compreso tra Sesto a Moriano e il bivio per Valdottavo, in Provincia di Lucca.

La finalità del lavoro consisteva nella determinazione

della corretta riprofilatura del versante e della esatta ubicazione delle eventuali opere di sostegno: risultava pertanto di fondamentale importanza determinare le aree di potenziale distacco di blocchi di roccia. Questo studio si è ben prestato alla sperimentazione in quanto ha riguardato un'area con una situazione geologica, geomeccanica e strutturale significativamente omogenea e quindi validamente modellizzabile.

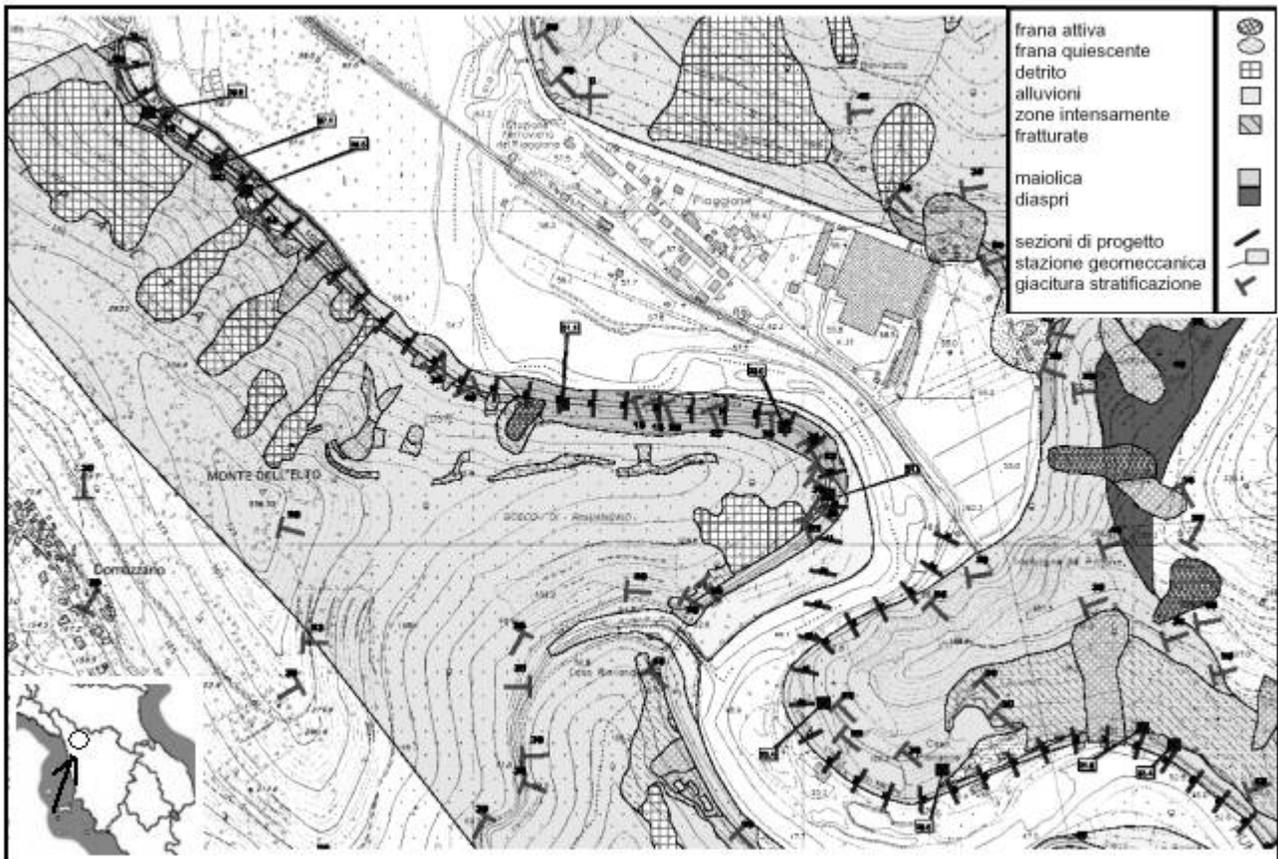


Figura 1 - Progetto di allargamento di carreggiata e costruzione di un ponte lungo la Strada Provinciale n°20 nei pressi di Rivangaio (Valle del Serchio, Lu)

Plan of carriageway widening and construction of a bridge on the Provincial road n°20 near Rivangaio (Serchio Middle Valley, Lucca)

Aspetti geologici dell'area di studio

L'area studiata è situata all'interno della depressione tettonica della Val di Serchio, ad est della finestra tettonica delle Alpi Apuane. In questa zona affiorano formazioni appartenenti alla Falda Toscana, rappresentata in particolare dalla parte sommitale della successione mesozoica, prevalentemente carbonatica. La storia tettonica di quest'area s'inserisce nel quadro evolutivo dell'Appennino settentrionale, che rappresenta una catena a falde di ricoprimento, prodotto di una complessa storia evolutiva polifasata (Elter, 1960, 1973; Dallan & Nardi, 1972, 1978; Federici & Rau, 1980; Boccaletti et al., 1980; Boccaletti &

Coli, 1983; Bartolini et al., 1983), schematicamente riferibile a due periodi principali:

Cretaceo superiore-Miocene sup.: prevale uno stile compressivo, responsabile dell'impilamento e della messa in posto delle unità tettoniche, riferibili a domini paleogeografici diversi (da ovest verso est: Dominio Ligure, Dominio Subligure, Dominio Toscano);

Miocene sup.-Pliocene inf.: si instaura uno stile tettonico estensionale, con la formazione di depressioni tettoniche (Val di Serchio, Val di Magra, ecc.), in cui si depongono successioni lacustri e fluviali; queste depressioni sono limitate da sistemi di faglie dirette con direzione

“appenninica” (NW-SE), talora interrotte da dislocazioni trasversali, “antiappenniniche”.

In seguito, si verificano ulteriori movimenti differenziali, di sollevamento, abbassamento e basculamento, più significativi a partire dal Pleistocene medio (Federici & Rau, 1980; Bartolini et al., 1983; Puccinelli, 1987; D’Amato Avanzi & Puccinelli, 1989); ad essi segue il rapido approfondimento del reticolo idrografico, con lo sviluppo di grandi dislivelli e il forte incremento dell’energia del rilievo. Alcune caratteristiche morfotettoniche (riattivazione dell’erosione fluvio-torrentizia, fasi di terrazzamento, sollevamento di depositi recenti, attività sismica, localizzazione degli epicentri dei terremoti) fanno ritenere che questi movimenti perdurino tuttora in vaste aree della Val di Serchio.

I principali lineamenti morfologici sono sostanzialmente riconducibili alla depressione morfo-strutturale della valle, cui si associa un evidente condizionamento sull’assetto del reticolo idrografico, con il Serchio che scorre prevalentemente nella zona assiale della depressione, in direzione appenninica, e gli affluenti, che scendono dall’Appennino e dalle Alpi Apuane, in direzione anti-appenninica. Sul paesaggio è anche riconoscibile, la marcata influenza delle caratteristiche litologiche delle formazioni affioranti. Nell’area studiata sono chiaramente individuabili le principali deformazioni, compressive e distensive, derivanti dalla storia tettonica precedentemente illustrata. In particolare, lo stile compressivo ha dato origine a due fasi deformative di tipo duttile con direzione appenninica, pressoché coassiali, cui si associano elementi tettonici trasversali; lo stile distensivo, di tipo rigido, ha dato luogo ai sistemi di faglie, con direzione NW-SE: sul lato occidentale del graben del Serchio le faglie immergono verso est, mentre sul lato orientale esse immergono verso ovest. Le formazioni affioranti lungo il tracciato stradale (Fig.1) sono riferibili, come precedentemente accennato, alla Falda Toscana:

DIASPRI (DSD): affiorano esclusivamente lungo la strada ai piedi del bosco di Rivangaio; sono costituiti da una litofacies caratteristica, che comprende radiolariti e selci rosse, verdi o grigie in strati spessi da 2 a 10 cm, intensamente fratturati, con sottilissime intercalazioni di argilliti silicee rosse, verdi e grigio-verdi.

MAIOLICA (MAI): La formazione, molto ben rappresentata nell’area di studio, è costituita da calcilutiti e calcilutiti silicee grigie, grigio-chiare o marroncino chiaro, a frattura concoide, in strati spessi da 10-30 cm a 3-4 m, con intercalazioni di calcareniti e calciruditi gradate grigie e grigio-scure e di rari e sottili livelli di argilliti calcaree o di marni grigie, grigio-verdi o scure. I noduli e le liste di selce chiara, spesse fino a 15 cm, sono talvolta molto abbondanti.

I versanti in esame mostrano un assetto strutturale complesso, caratterizzato dalla stratificazione immergente in prevalenza a sud-est, e da moltissime discontinuità tettoniche, a grande e a piccola scala, comprendenti numerose faglie dirette, con rigetti variabili. I movimenti

gravitativi più frequenti sono in alcuni casi rappresentati da scivolamenti planari lungo i piani di discontinuità, in particolar modo lungo la marcata stratificazione, ma più frequentemente si osservano crolli e movimenti complessi tipo scivolamento-crollo in zone particolarmente acclivi, e per questo più esposte al rischio di distacco dei massi. Ad aumentare la possibilità di distacco è anche il fenomeno dell’infiltrazione delle acque lungo i giunti, in una zona come questa caratterizzata da abbondanti precipitazioni, oltre che la possibile formazione di ghiaccio all’interno delle discontinuità nei periodi più freddi. Ove tali formazioni non sono affioranti, sono presenti coperture quaternarie tra cui prevale il detrito di versante. In questa sede, in considerazione dell’applicazione della classificazione, riferita esclusivamente agli ammassi rocciosi, non sarà tenuto in considerazione il comportamento geotecnico delle coperture.

Caratteri litologico-tecnici delle formazioni

Lo studio litologico-tecnico di dettaglio è stato eseguito sulle formazioni affioranti, mediante rilievi geomeccanici di campagna e test di misura indiretta della resistenza a compressione uniassiale (Martello di Schmidt, Point Load Test). È stata quindi applicata la classificazione RMR (Rock Mass Rating) di Bieniawski (1989), che tiene conto di 5 parametri (resistenza a compressione monoassiale, RQD, spaziatura delle discontinuità, condizioni dei giunti, condizioni idrauliche dei giunti) relativi allo stato della roccia e dell’ammasso; essa ha permesso la definizione di parametri geomeccanici, quali angolo di attrito e coefficiente di coesione ed una valutazione qualitativa globale dell’ammasso roccioso, data dall’indice RMR di base. Nell’ottica di un inquadramento globale delle condizioni di stabilità dell’area in esame, si è ritenuto opportuno, una volta definite le caratteristiche geomeccaniche delle formazioni in esame, analizzare in dettaglio l’assetto delle discontinuità, con l’individuazione dei blocchi in situazioni di stabilità critiche e i cinatismi che si possono verificare in condizioni statiche, riservando ad un successivo approfondimento l’esame delle condizioni al contorno, quali carichi esterni, sovrappressioni interstiziali, sollecitazioni sismiche.

Al fine di suddividere in zone omogenee gli ammassi rocciosi presenti nella zona in esame, sono state confrontate le caratteristiche rilevate in 10 stazioni geomeccaniche: i risultati hanno evidenziato che la situazione strutturale dell’area può essere considerata ragionevolmente omogenea, in quanto nei diversi litotipi sono state rilevate le medesime famiglie di discontinuità, a testimonianza di una medesima storia tensionale. Gli ammassi sono risultati distinguibili in 3 zone:

ZONA 1 – classe II di Bieniawski ($RMR_{BASE} = 67$): calcare Maiolica

Questo litotipo mostra una sostanziale uniformità strutturale nell’ammasso roccioso, evidenziando una

stratificazione regolare, con strati di spessore fino a 60 cm. La roccia risulta resistente (valori medi intorno a 85 MPa), con spaziatura delle discontinuità globalmente moderata; le condizioni delle discontinuità variano tra le diverse famiglie: da chiuse ed asciutte fino ad aperte e riempite di materiale sciolto.

ZONA 2 – classe III di Bieniawski ($RMR_{BASE} = 56$): calcare Maiolica fratturato

Questo litotipo si distingue dal precedente per la fratturazione più intensa, e per condizioni delle discontinuità più scadenti da un punto di vista geomeccanico. Visto il dettaglio raggiunto, si è ritenuto opportuno differenziare questa seconda classe, definita da un minore indice di qualità RMR

ZONA 3 – classe III di Bieniawski ($RMR_{BASE} = 47$): Diaspri

Hanno caratteristiche geomeccaniche piuttosto omogenee. Il litotipo radiolaritico, fittamente stratificato e a volte alternato a sottili interstrati argillitici, può essere considerato mediamente resistente: i valori di resistenza registrati, ottenuti principalmente tramite il test Point Load, non superano 2 KN/m². La spaziatura delle discontinuità è

risultata molto fitta nella maggior parte dei casi. Le fratture non sono mai continue; all'affioramento, si rilevano piuttosto molte piccole fratture non allineate, indice di scarsa qualità geomeccanica.

Carta di stabilità degli ammassi rocciosi

Le zone di più probabile distacco di massi e/o cunei sono state individuate valutando la stabilità delle pareti rocciose, in base alla classificazione proposta da Romana (1985, 1997). Tale classificazione, nata come applicazione di quella di Bieniawski ai pendii naturali, tiene conto dei rapporti spaziali reciproci fra le discontinuità rilevanti ai fini della stabilità (due sistemi distinti, per scivolamento planare (175/20) e ribaltamento (300/84), acclività ed esposizione dei versanti.

L'indice Slope Mass Rating si ottiene attraverso la seguente equazione:

$SMR = RMR_{base} + (F1 \times F2 \times F3) + F4$, in cui i fattori F1/F4 valutano quantitativamente le reciproche relazioni tra giaciture del pendio ($\alpha_s; \beta_s$) e delle discontinuità ($\alpha_j; \beta_j$):

	F1	F2	F3	F4
SCIVOLAMENTO	$ \alpha_j - \alpha_s $	$ \beta_j $	$\beta_j - \beta_s$	Dipendente dal metodo di escavazione o pendio naturale
RIBALTAMENTO	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$ \beta_j $	$\beta_j + \beta_s$	

Solitamente, tale classificazione viene utilizzata per valutare la stabilità di una singola parete rocciosa, dotata di univoca giacitura. Tramite l'utilizzo di una piattaforma GIS è stato possibile determinare la variazione areale dell'indice SMR. I sistemi GIS, infatti, compiono, mediante sovrapposizioni (*overlay*) di carte tematiche, operazioni aritmetiche logiche e condizionali (*spatial modelling*) tra gli attributi delle singole unità areali.

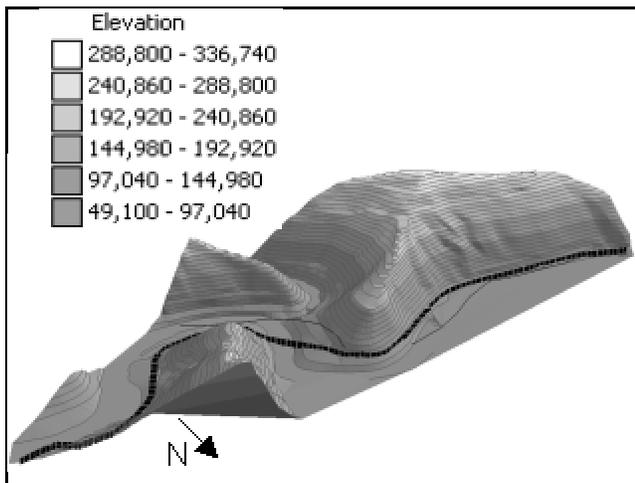


Figura 2 - Modello digitale di elevazione (DEM) della zona in esame

Digital Elevation Model of examined area

Per la realizzazione delle carte tematiche è stata utilizzata una risoluzione di 5 m, pari alla precisione della base topografica utilizzata.

L'elaborazione che ha portato alla realizzazione di una "Carta delle classi di stabilità SMR" ha seguito i seguenti punti fondamentali:

- realizzazione del DTM sulla base topografica disponibile: è una rappresentazione digitale di una superficie topografica espressa come punti (x,y,z) organizzati in modelli. Tale modello è stato ottenuto tramite una vettorializzazione delle curve di livello della base topografica georeferenziata, con successiva rasterizzazione ed interpolazione delle quote tramite l'uso di algoritmi (Fig.2);
- realizzazione della carta delle pendenze (Fig.3) e della carta dell'esposizione;
- realizzazione e successiva rasterizzazione delle carte delle famiglie di discontinuità (una mappa per ognuno dei due sistemi principali) e della carta dell'indice RMR di base, derivanti da rilevamento di campagna;
- utilizzo delle funzioni di *overlay* tra gli attributi delle carte delle famiglie di discontinuità e quelli delle carte della pendenza e dell'esposizione dei versanti, per la realizzazione delle carte dei fattori F1 (Fig.4/5), F2, F3 (Fig.6/7) di Romana;
- utilizzo delle funzioni di *overlay* tra la carta dell'indice RMR di base, le carte dei fattori F1, F2, F3 di Romana ed il fattore F4, per la realizzazione della carta

dell'indice SMR (Fig.8/9); il fattore F4 è stato considerato costante, in quanto si tratta in massima parte di affioramenti naturali e la piccola parte di affioramenti artificiali ha dimensioni inferiori alla risoluzione delle carte utilizzate (1:5.000)

Conclusioni

I risultati ottenuti tramite l'analisi areale dell'indice SMR di Romana, al fine di evidenziare le zone di potenziale distacco, si sono rivelati piuttosto soddisfacenti ed hanno richiesto un tempo di elaborazione relativamente breve. Nelle Figg. 8 e 9 si osserva la distribuzione dell'indice SMR: è interessante osservare come l'SMR, nel caso dello scivolamento planare, cambi in relazione alla variazione del fattore F1, legato alle relazioni tra direzioni di immersione di pendio e giunti; nel caso del ribaltamento, il valore di SMR cambia proporzionalmente al fattore F3, legato alle relazioni tra pendenze di giunti e pendio.

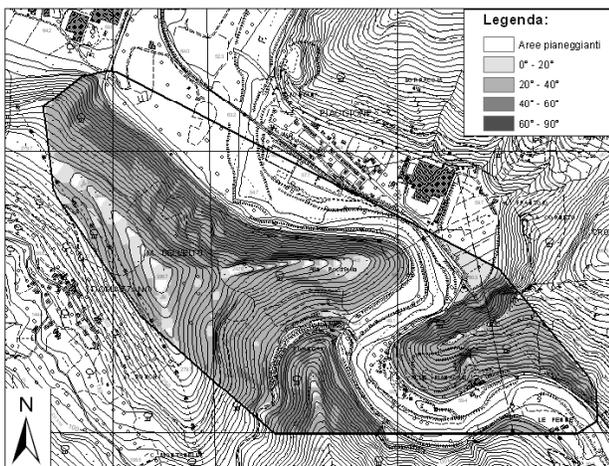


Figura 3 - Grid relativo alla pendenza del versante per l'area in esame.
Grid of the slope

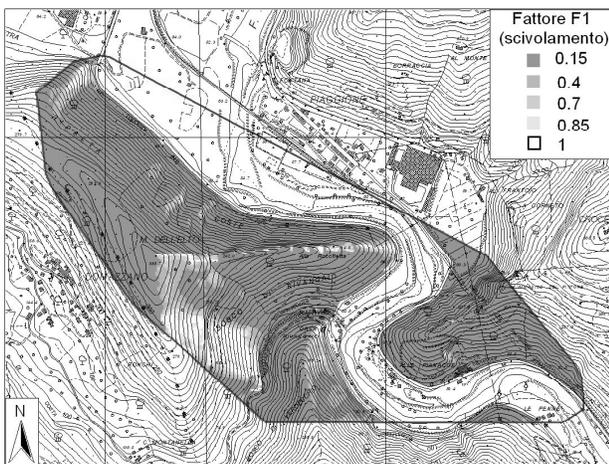


Figura 4 - Fattore F1 dell'indice SMR di Romana per lo scivolamento planare.
F1 factor of index SMR for plane failure

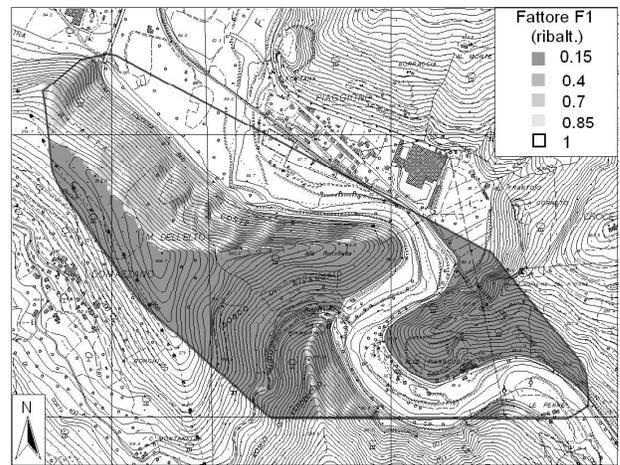


Figura 5 - Fattore F3 dell'indice SMR di Romana per lo scivolamento planare
F3 factor of index SMR for plane failure

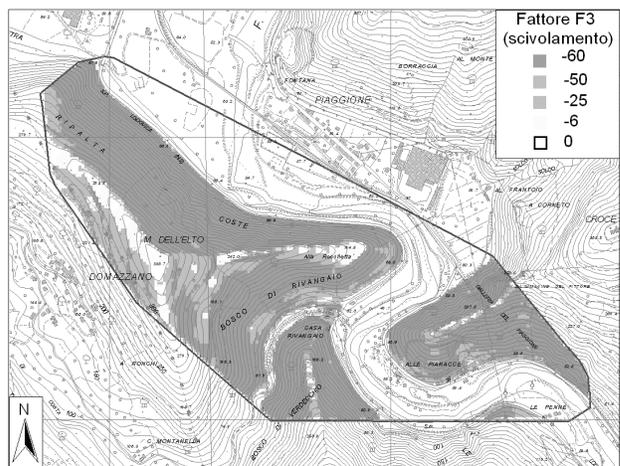


Figura 6 - Fattore F1 dell'indice SMR di Romana per il ribaltamento.
F1 factor of index SMR for toppling

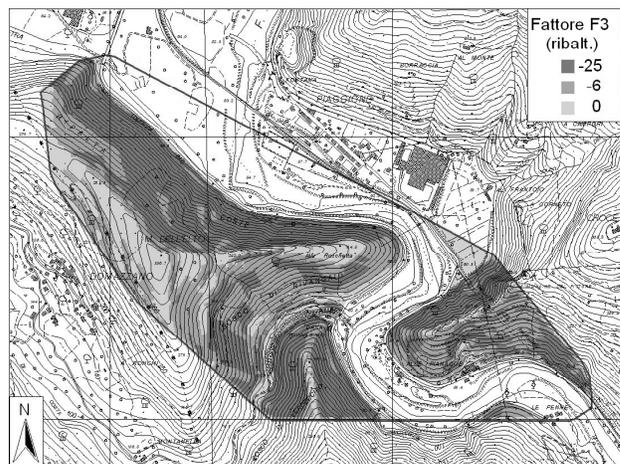


Figura 7 - Fattore F3 dell'indice SMR di Romana per il ribaltamento
F3 factor of index SMR for toppling

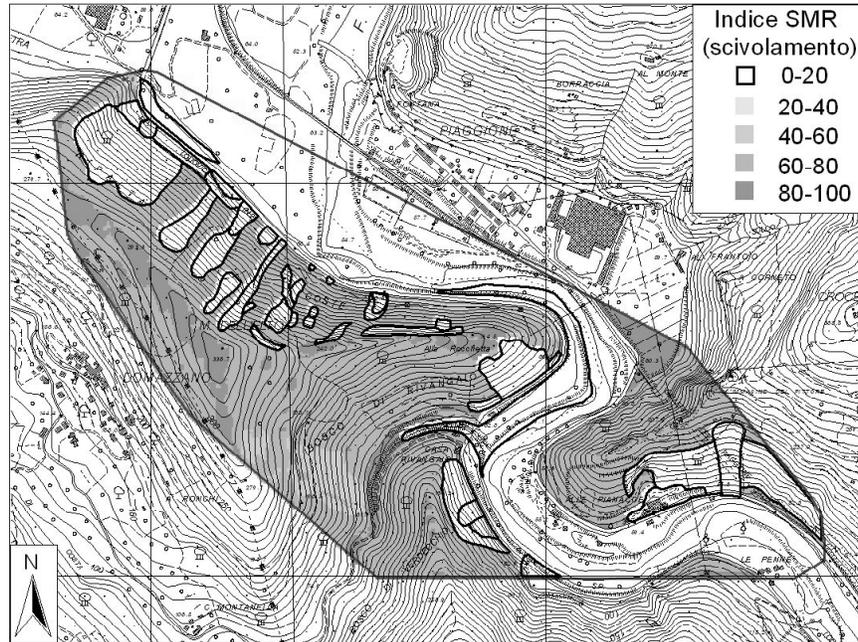


Figura 8 - Indice Slope Mass Rating relativo allo scivolamento planare per l'area in esame
SMR Index for plane failure

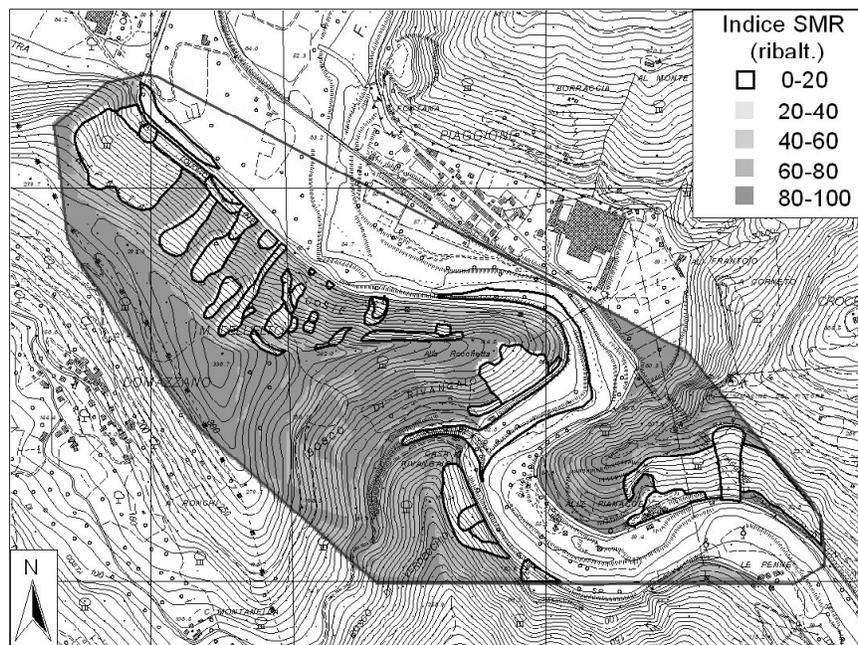


Figura 9 - Indice Slope Mass Rating relativo allo scivolamento planare per l'area in esame
SMR Index for toppling

La scelta di 5 classi nelle Figg. 8 e 9 è stata fatta per proporre un esempio di come possano essere visualizzati i risultati, ma è importante ricordare che per ogni punto del *grid*, ovvero per ogni *pixel*, è possibile determinare il valore di SMR e quindi la suddivisione in classi diventa del tutto arbitraria. I risultati sono stati verificati attraverso il riscontro reale derivato dallo studio geomorfologico e

geomeccanico: sono state ottenute le porzioni di versante potenzialmente a rischio di frana, che sono state confrontate con le porzioni di versante franate. Verificata l'attendibilità, il metodo utilizzato ha consentito di delimitare arealmente, anche in ubicazioni inaccessibili, le porzioni di versante potenzialmente instabili e di classificarle in base al grado di stabilità.

Bibliografia

- Bartolini C., Bernini M., Carloni G.C., Costantini A., Federici P.R., Gasperi G., Lazzarotto A., Marchetti G., Mazzanti R., Papani G., Pranzini G., Rau A., Sandrelli F., Vercesi P.L., Castaldini D. & Francavilla F. 1983 - Carta neotettonica dell'Appennino Settentrionale. Note illustrative. *Boll. Soc. Geol. It.*, 101, 523-549.
- Bieniawski Z.T., 1989 - Engineering Rock Mass Classifications - J. Wiley & Sons, New York, pp.251
- Boccaletti M. & Coli M., 1983 - La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione. *Mem. Soc. Geol. It.*, 25, 51-62.
- Boccaletti M., Coli M., Decandia F. A., Giannini E. & Lazzarotto A., 1980 - Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 21: 359-373.
- Dallan Nardi L. & Nardi R., 1972 - Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino Settentrionale. *Mem. Acc. Lunig. Sc. "G. Capellini"*, 42, 1-212.
- Dallan Nardi L. & Nardi R., 1978 - Il quadro paleotettonico dell'Appennino settentrionale: un'ipotesi alternativa. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 85, 289-298.
- D'Amato Avanzi G. & Puccinelli A., 1989 - La valle villafranchiana della Turrice di Galliciano (Val di Serchio) e le sue implicazioni neotettoniche. *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 1, 147-154.
- Elter P., 1960 - I lineamenti tettonici dell'Appennino a Nord Ovest delle Apuane. *Boll. Soc. Geol. It.*, 79 (2), 273-312.
- Elter P., 1973 - Lineamenti tettonici ed evolutivi dell'Appennino settentrionale. In: *Atti Conv. Moderne vedute sulla geologia dell'Appennino. Acc. Naz. Lincei, Quad.*, 183, 97-118.
- Federici P.R. & Rau A., 1980 - Note illustrative della neotettonica del Foglio 96 Massa. In: *Contrib. Prelim. Realizz. Carta Neotett. d'It., CNR- PF Geodin.*, pubbl. n. 356, 1365-1382.
- 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.
- Romana, M. (1985) - New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, in *ISRM Zacatecas, Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics*, pp. 49-53.
- Romana, M. (1992) - Métodos de corrección de taludes según la clasificación Geomecánica SMR, III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, La Coruña, vol. II, pp. 629-650.
- Romana, M. (1997) - El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes, in Alonso et al. (eds.).