

# Una metodologia integrata in ambiente GIS per l'analisi dei fenomeni di crollo: il caso di studio di Monte delle Formiche (BO)

Lorenzo Del Maschio<sup>1</sup>, Marco Pizziolo<sup>1</sup>, Giampiero Gozza<sup>1</sup>, Daniela Piacentini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geologo, Servizio geologico, Sismico e dei Suoli. Regione Emilia-Romagna.

## 1. Premessa

Il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia - Romagna ha in corso di sviluppo un programma pluriennale finalizzato alla valutazione della pericolosità sul territorio regionale dei fenomeni di crolli di roccia e allo sviluppo di una metodologia di facile utilizzo e interfacciabile con gli strumenti di analisi territoriale (GIS) che permetta la elaborazione di mappe speditive di pericolosità relativa di tali fenomeni, poi sviluppabili per approfondimenti successivi in qualunque situazione si verificano fenomeni di questo genere.

La necessità di realizzare un programma di questo genere nasce da tre considerazioni:

- 1) sia pure minoritari rispetto ad altri tipi di frane, in Appennino i crolli risultano abbastanza frequenti e diffusi, tanto che negli ultimi anni si è riscontrato un numero abbastanza elevato di tali fenomeni, che, in alcune situazioni, hanno provocato danni sia alle infrastrutture viarie e sia ad alcuni edifici;
- 2) la realizzazione della carta geologica 1:10000 della

Regione Emilia-Romagna, ultimata e completamente digitalizzata, permette la individuazione su tutto il territorio delle unità stratigrafiche, degli affioramenti, e quindi anche delle pareti rocciose denudate che costituiscono le principali aree di potenziale innesco dei crolli. Le coperture quaternarie, pure riconosciute con cura non sono a volte state distinte per genesi (molti accumuli per crollo sono compresi nel tipo "Detrito di Falda " o "Deposito di versante s.l.") né, in molte situazioni, l'accumulo dei materiali esaurisce l'ambito territoriale delle aree soggette a tali fenomeni, tanto più che, frequentemente i massi crollati vengono sovente rimossi dai proprietari dei terreni. Esiste quindi un obiettivo limite alla definizione delle aree soggette a crolli derivate esclusivamente dal rilevamento geologico di campagna;

- 3) le tecniche GIS sviluppate negli ultimi anni e il patrimonio di conoscenze derivanti dalla informatizzazione della Carta geologica 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna, permettono l'applicazione a larga scala di modelli cinematici di propagazione dei crolli, facilmente disponibili sul mercato informatico, offrendo una soluzione, sia pure parziale, al problema della valutazione

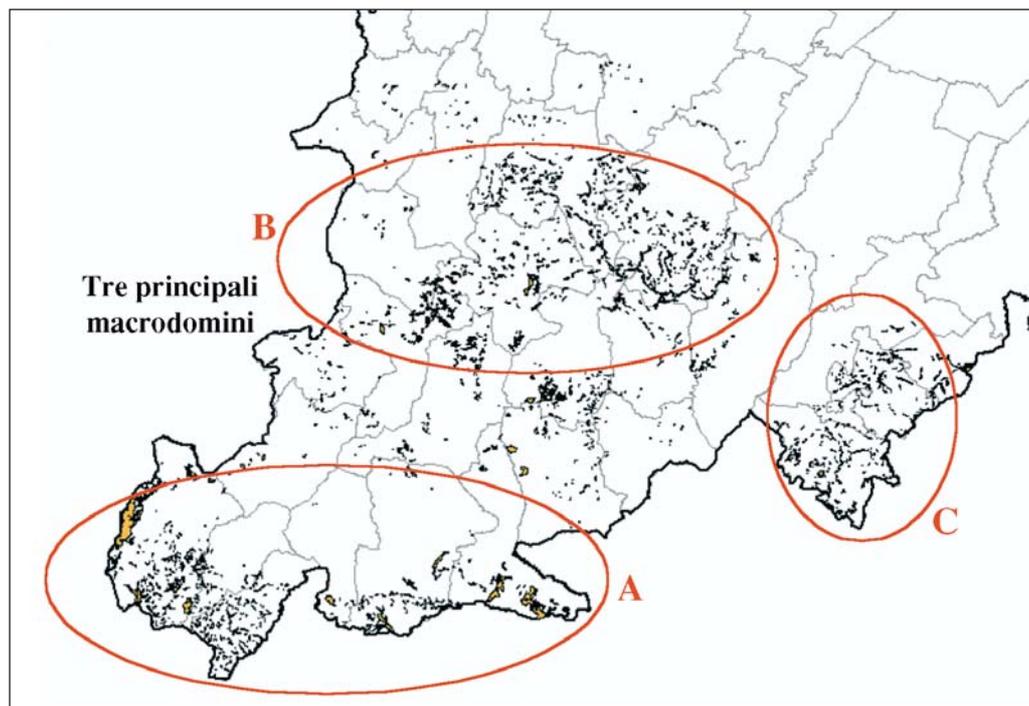


Figura 1.

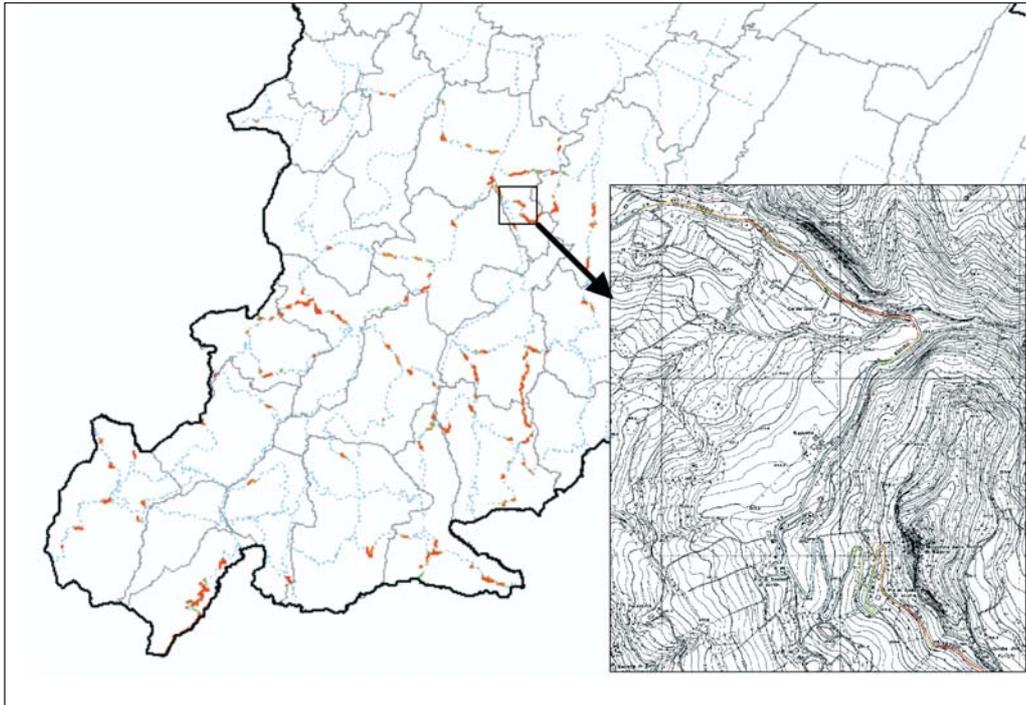


Figura 2.

della pericolosità e del rischio del fenomeno, superando e/o migliorando le tradizionali Carte-Inventario oggi disponibili.

## 2. Approccio metodologico

Partendo dai dati esistenti disponibili, integrati in ambiente GIS (carta geologica 1:10.000, nuovo DEM regionale a maglia 10 metri, carta dell'uso reale del suolo 1:25.000 prodotta dal Servizio Sistemi Informativi geografici della Regione Emilia - Romagna, ortofoto digitali), il programma è stato sviluppato preliminarmente nella Provincia di Bologna e suddiviso nelle seguenti fasi principali:

- individuazione delle potenziali aree di innesco crolli;
- rilevamento geologico-geomorfologico di dettaglio, per le aree campione, al fine della corretta individuazione delle aree omogenee dal punto di vista della parametrizzazione geomeccanica e per la definizione delle volumetrie coinvolte;
- stima dei coefficienti di restituzione normale, tangenziale e di attrito e definizione dell'angolo limite;
- modellazione cinematica attraverso l'applicativo **ROTOMAP** (Ing. G. Scioldo-Geo&Soft srl) in grado di simulare le traiettorie di propagazione, le altezze di volo, i punti di arresto dei singoli blocchi e di calcolare le energie cinetiche massime e medie degli scendimenti simulati da utilizzare nella progettazione di opere di difesa paramassi;
- calibrazione e validazione del modello con sperimentazione, tuttora in corso, a numerosi casi studio reali;
- applicazione della metodologia utilizzata per analisi condotte a scala regionale.

## 3. Individuazione delle potenziali aree di innesco crollo

Tra i vari strati informativi disponibili dalla Carta geologica 1:10000 digitalizzata è stata estratta la carta degli affioramenti. Tali informazioni sono state incrociate con l'Archivio storico delle frane della provincia di Bologna, realizzato dall'Autorità di Bacino del Reno, e con segnalazioni di crolli fornite dai Servizi tecnici di Bacino e dalla Provincia di Bologna. Successivamente è stata effettuata una verifica della corrispondenza degli affioramenti sia con le aree individuate tramite le ortofoto digitali, sia con la geologia dell'area, selezionando opportunamente solo quelle ricadenti all'interno delle unità geologiche capaci di generare crolli in tutta la zona collinare-montuosa del territorio considerato: è stata così realizzata la "Carta inventario delle potenziali aree di innesco crolli" (Figura 1). Si può notare dalla carta prodotta come siano identificabili tre principali aree maggiormente predisposte a generare fenomeni di questo genere: in particolare esse ricadono in corrispondenza delle Formazioni appartenenti alla serie Toscana (area A), di parte della successione Epiligure e del Pliocene Intrappenninico (Area B) e della Formazione Marnoso-Arenacea (Area C).

La creazione di questo nuovo database specifico è servita, in una fase successiva, nel segnalare le principali infrastrutture viarie (strade statali e provinciali) (Figura 2) ed i principali centri abitati (Figura 3) a rischio potenziale di caduta massi, tramite creazione di un "buffering", dalla zona sorgente, con distanza rispettivamente a 50, 100 e 150 m dall'affioramento stesso.



Figura 3.

#### 4. Rilevamento geologico-geomorfologico dell'area campione e stima dei coefficienti di restituzione normale, tangenziale e di attrito

Fra le aree campione selezionate viene qui illustrata quella di Monte delle Formiche, rappresentata dalla zona di scarpata situata sotto il santuario omonimo, che corre circa lungo il limite comunale che separa il territorio di Pianoro da quello di Monterenzio. La parete ha uno sviluppo sub-verticale da quota 500m circa

a quota 610m circa e, geologicamente parlando, appartiene alla Formazione di Monte Adone, Membro di Monte delle Formiche, costituita da arenarie e conglomerati a stratificazione da media a molto spessa, tabulare o obliqua a grande scala. L'area è stata scelta sulla base di numerose considerazioni effettuate: la facile accessibilità del sito, le evidenze geomorfologiche di numerosi crolli precedenti, tra cui un crollo avvenuto recentemente, (estate 2002) (Figura 4) e tuttora ben visibile sul terreno, ed una buona copertura

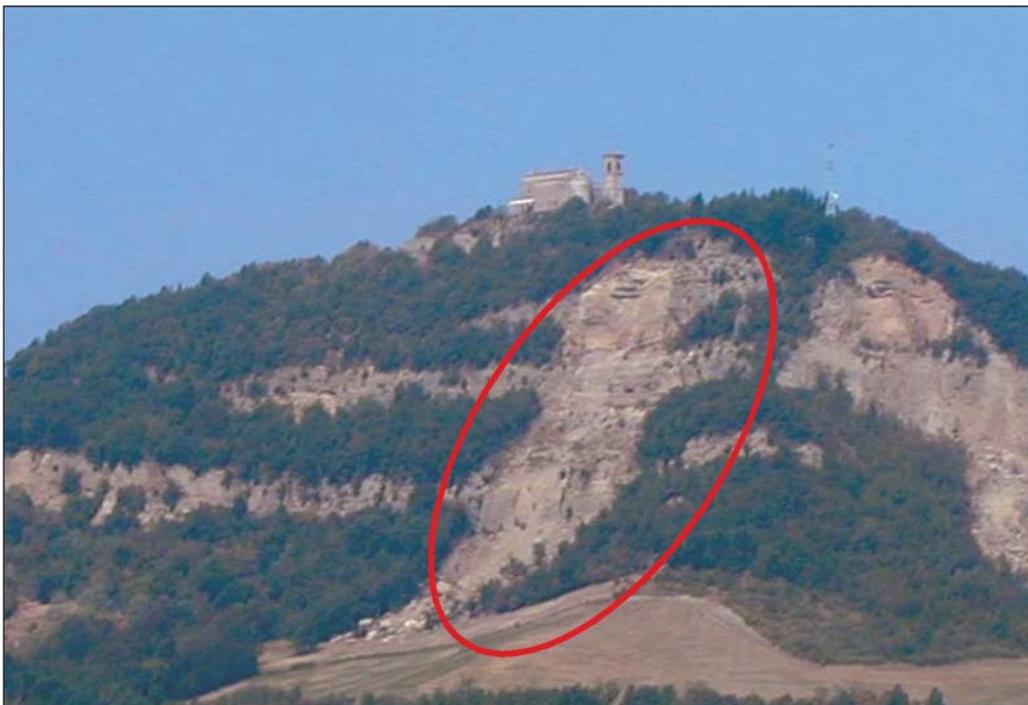


Figura 4.

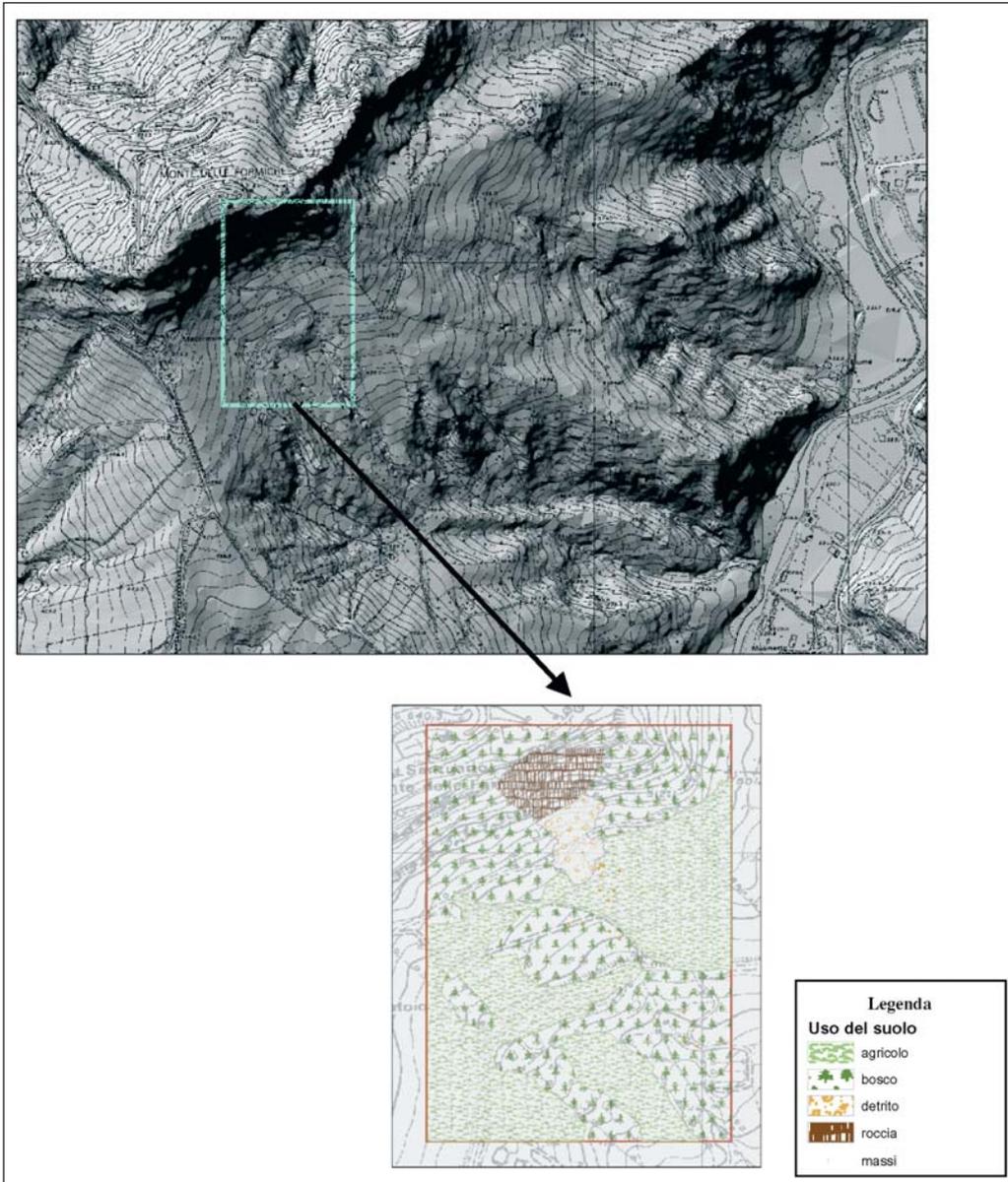


Figura 5.

del segnale satellitare (a fini di rilievi condotti con GPS). Poiché la simulazione delle traiettorie di discesa dei blocchi mobilizzati da locali rotture delle pareti rocciose necessita di una zonizzazione “geomeccanica” delle diverse parti del versante, che tenga conto delle reali differenziazioni topografiche e litologiche, è stato condotto un rilievo geologico-geomorfologico di dettaglio dell’area, comprensivo di:

- localizzazione e dimensionamento dei blocchi già franati;
- individuazione della scarpata di distacco ;
- campagna speditiva per raffinare i dati topografici con punti battuti con GPS;
- carta dell’uso del suolo.

Pur essendo disponibile quella fornita dalla RER a scala 1:25000, è stata prodotta una originale carta dell’uso del suolo a scala 1:10000 per migliorare la definizione delle aree e quindi attribuire più correttamente i parametri di restituzione energetica del terreno (Figura 5).

Dai dati topografici rilevati, integrati col DEM di partenza è stato realizzato un nuovo DEM per l’area della sperimentazione (2x2m), al fine di ottenere celle di lavoro del tutto adeguate alla scala del problema che si è presentato e quindi compatibili con la dimensione media dei blocchi riscontrati in campagna (alcuni m<sup>3</sup>).

Successivamente sono stati definiti i parametri di restituzione energetica del terreno sia in fase di urto, sia in fase di rotolamento dei massi; di ogni singola maglia, in cui è stato suddiviso il DEM, sono stati così calcolati rispettivamente i coefficienti di restituzione normale, tangenziale e il coefficiente di attrito di rotoscivolamento. A questi va aggiunta la scelta dell’angolo limite, angolo al di sopra del quale si realizza la condizione di rimbalzo del masso (tragitto aereo).

I primi due valori sono stati ottenuti sia da precedenti lavori trovati in bibliografia (BROILI, 1978; FOCARDI, 1982; PARONUZZI, 1987; HUNGR & EVANS, 1988;

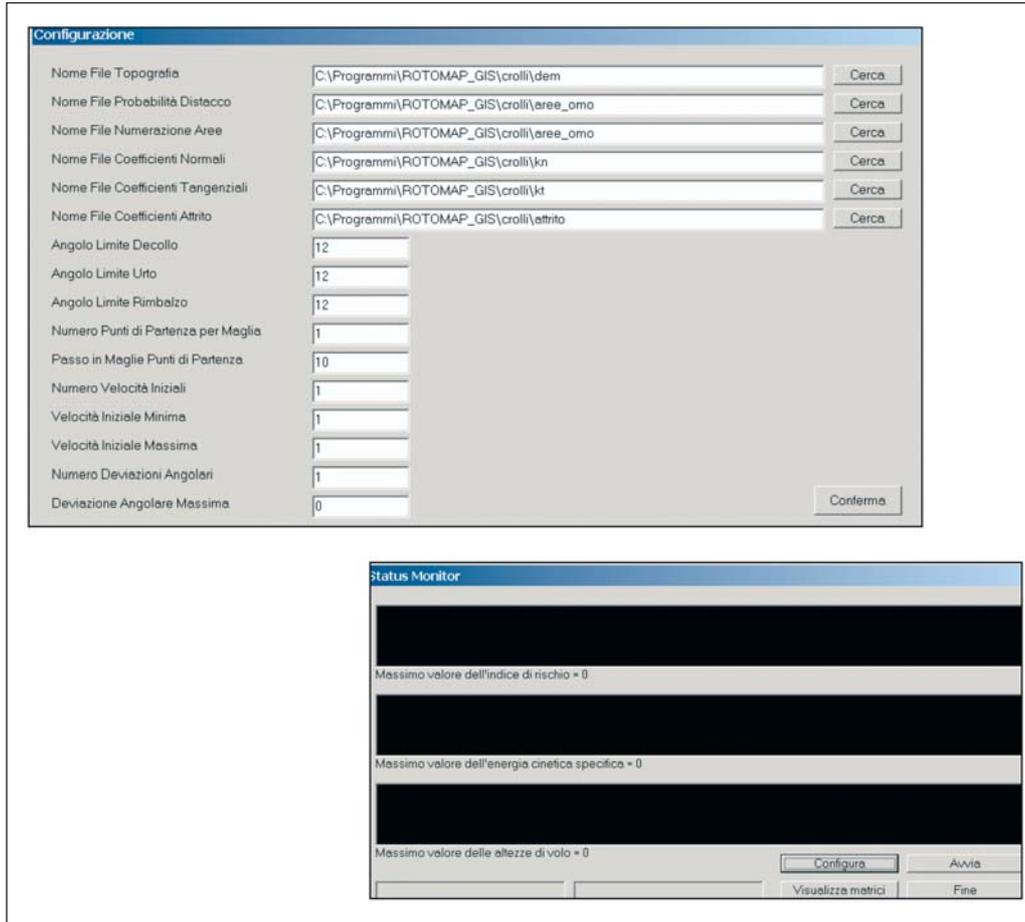


Figura 6.

PFEIFFER & BOWEN, 1989; PARONUZZI, 1989; PARONUZZI 1990; SCIOLDO, 1991; PARONUZZI-COCCOLO, 1995; GIANI, 1997) sia dall'esperienza diretta sul terreno, in base alle dimensioni reali dei blocchi; lo stesso materiale, infatti, detrito o roccia in posto, può rispondere in modo elastico all'urto di blocchi di piccole dimensioni, o assorbire una parte consistente di energia per fratturazione e dislocazione del materiale, quindi con comportamento plastico nel caso di urto di blocchi di dimensioni maggiori. Il coefficiente di attrito di roto-scivolamento è stato opportunamente scelto non solo in base alle dimensioni dei massi, ma anche sulla presenza delle asperità del terreno, mentre l'angolo limite, il parametro più difficile da determinare poiché viene utilizzato per individuare le condizioni in cui avviene il passaggio da roto-scivolamento a volo libero e viceversa, non dipende solo dalla geometria del terreno essendo calcolato nel piano verticale alla direzione del moto. I valori utilizzati sono esposti in tabella 1. Si sottolinea che i valori in tabella sono allo stato attuale adatti alla sola sperimentazione effettuata.

## 5. Il modello cinematico

Il metodo di calcolo considera l'analisi statistica del rotolamento dei massi lungo un pendio. L'applicativo scelto non necessita a priori di un rilievo geomecca-

nico per l'individuazione della fratturazione della parete rocciosa e quindi della sua stabilità in quanto viene ipotizzata la situazione di partenza più sfavorevole, considerando come soggetta a distacco l'intera parete rocciosa. Tale caratteristica, che può apparire come un limite oggettivo alla modellazione di tali fenomeni, in realtà costituisce la sua forza, in quanto consente di lavorare su un numero assai più ampio di pareti rocciose, di ridurre notevolmente i costi e di diminuire l'incertezza determinata dalle analisi di stabilità. Ovviamente i risultati vanno analizzati criticamente ed eventualmente migliorati per studi specifici di maggior dettaglio.

Bisogna inoltre evidenziare come:

- la scelta di utilizzare, per la rappresentazione della superficie topografica, un modello tridimensionale è stata effettuata in quanto molto spesso la traiettoria percorsa dai massi non giace su di un piano verticale, né può essere definito in modo univoco uno svi-

Tabella 1

Uso del Suolo	$K_n$	$K_t$	Attrito di Rotoscivolamento
Roccia	0,5-0,7	0,8-0,9	0,35-0,40
Bosco	0,28-0,32	0,78-0,82	0,7
Suolo agricolo	0,2-0,3	0,2-0,4	0,5
Detrito	0,4-0,6	0,7-0,8	0,7-0,8

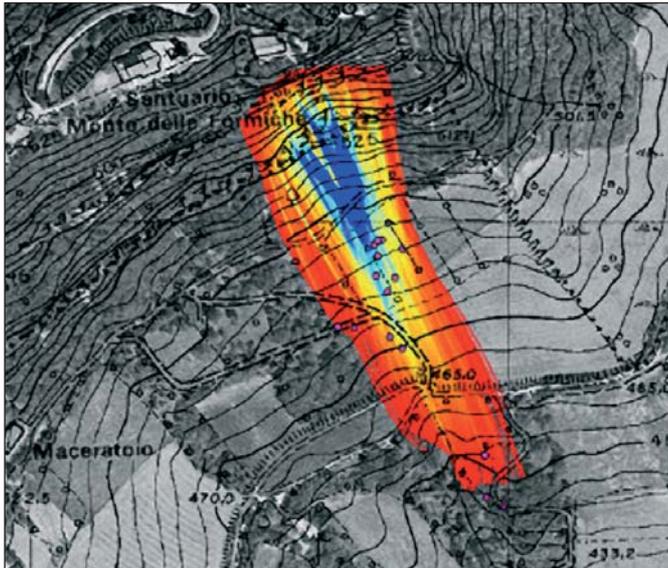


Figura 7a.

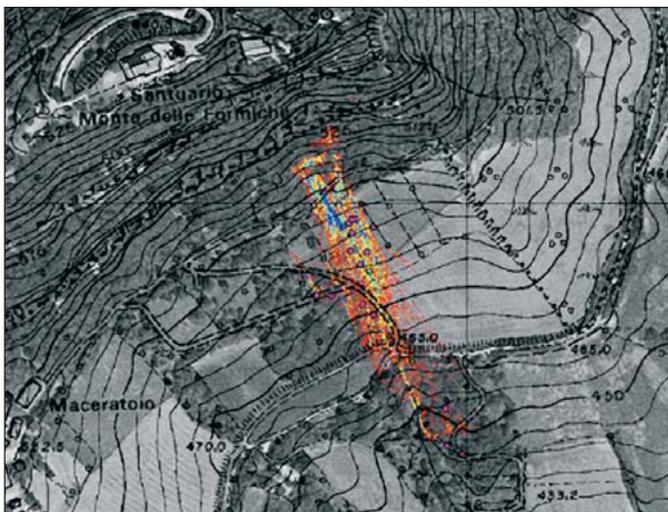


Figura 7b.

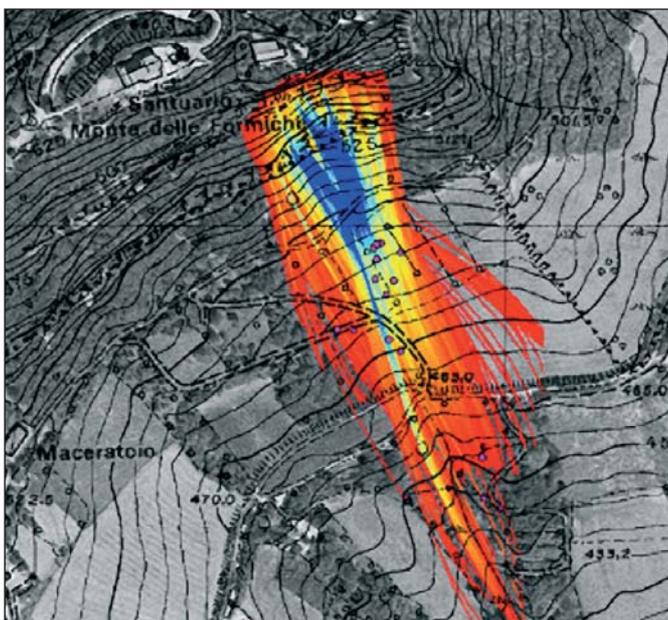


Figura 7c.

luppo cilindrico che possa contenere tutti gli scendimenti possibili. Utilizzare una superficie anziché una sezione è stato ritenuto più corretto e, quantunque il trattamento di sezioni sia estremamente più semplice, la loro utilizzazione costituisce nella maggior parte dei casi una semplificazione ritenuta troppo approssimativa;

- il rotolamento di massi appartiene ad una famiglia di fenomeni che presentano un comportamento assai "imprevedibile" in cui "piccole variazioni" nelle condizioni iniziali provocano, di norma, grandi (e quindi imprevedibili) variazioni nelle condizioni finali. Questo non significa affatto che il problema non possa a priori essere trattato, bensì semplicemente che non è pensabile poter effettuare una o poche simulazioni per la corretta taratura del modello, né tanto meno poter fare previsioni sul percorso e punto di arresto di un masso reale. Si è optato così per la valutazione del comportamento medio determinato attraverso la simulazione di un grande numero di scendimenti, ciascuno dei quali possa fornire l'informazione relativa ad un percorso "medio e più probabile" tra tutti quelli fisicamente ammissibili, rinunciando ad effettuare, così, previsioni di tipo deterministico.

Le operazioni effettuate hanno richiesto l'inserimento di dati raccolti durante la fase di rilevamento. I principali parametri inseriti sono stati (Figura 6):

- la ricostruzione geometrica del pendio;
- l'area di distacco;
- i parametri geomeccanici necessari al modello ;
- la massa dei blocchi, compatibile con quelli effettivamente ritrovati sul terreno.

Il modello cinematico, utilizzato dal programma per la simulazione del crollo, considera i massi come entità puntiformi ("lumped mass") piuttosto che come elementi ellissoidali. Il masso assume quindi un comportamento caratterizzato da sequenze di balzi lunghi e corti, con rallentamenti ed accelerazioni improvvise dopo ciascun urto. E' piuttosto discutibile affermare che tale comportamento sia veramente realistico, specie per blocchi di una certa massa che scendono lungo pendii costituiti da roccia alterata e detrito. E' comunque necessario osservare due cose: la prima è che il masso di fatto può non avere forma ellissoidale, e perciò non è possibile con questo artificio ottenere simulazioni più accurate; la seconda è che piccole variazioni di massa, velocità iniziale di rotazione e rapporto tra gli assi, conducono a percorsi completamente differenti, quindi considerare massi di forma ellissoidale introduce nel modello un maggior grado di difficoltà senza peraltro fornire realmente informazioni utili all'interpretazione. E' peraltro possibile tenere implicitamente conto dell'effetto della geometria del masso correggendo opportunamente il rapporto tra i coefficienti di restituzione energetica normale e tangenziale, variando il rapporto tra l'ampiezza e l'altezza dei singoli balzi.

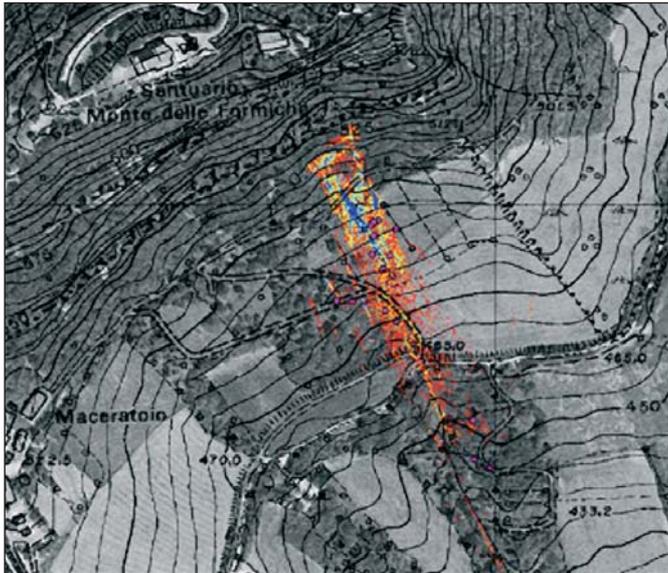


Figura 7d.

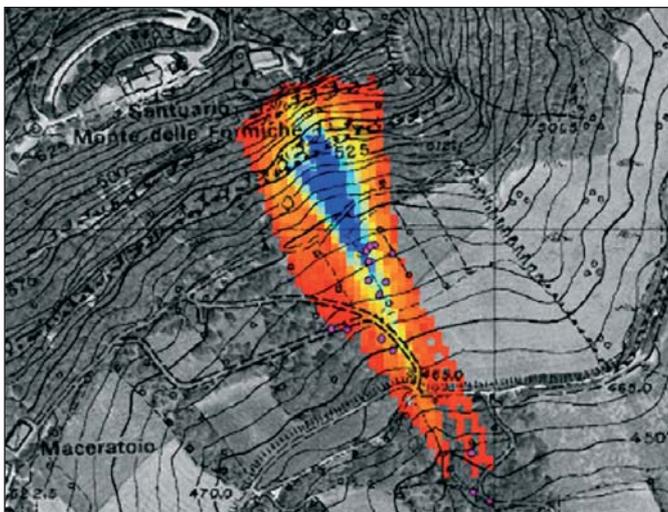


Figura 7e.

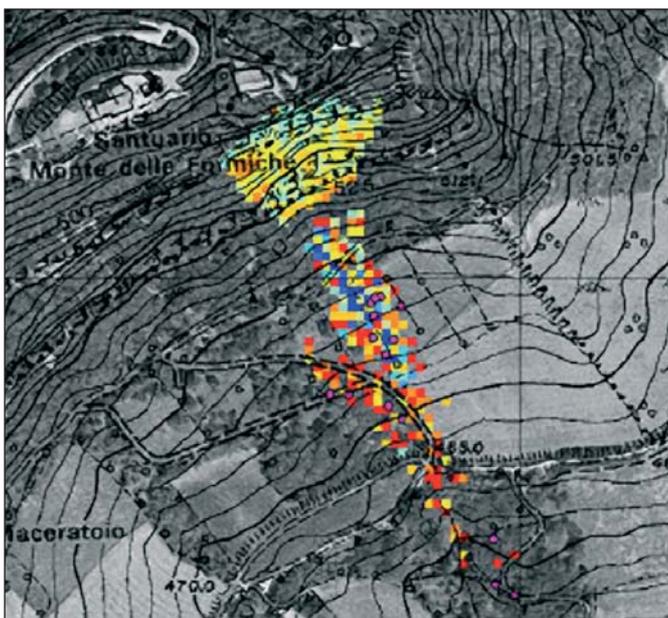


Figura 7f.

Il percorso dei singoli blocchi è ricavato dal DEM e le traiettorie dipendono dai punti di partenza, dalla topografia, dai coefficienti di restituzione tangenziale e normale e da quello di attrito che riducono la velocità nei punti di impatto oppure durante il rotolamento.

## 6. Analisi dei risultati (Figg. 7a-7h)

L'analisi delle simulazioni effettuate ha evidenziato l'importanza della corretta taratura di alcuni parametri che possiamo definire fondamentali anche ai fini della validazione del modello. E' stato osservato, infatti, come a piccole variazioni della dimensione della maglia del DEM e dei coefficienti di restituzione energetica normale e tangenziale e di attrito, corrispondano scenari differenti (si può vedere dai risultati di seguito proposti), denotando la necessità di disporre, in qualunque situazione di frana di crollo ci si trovi, di una ricostruzione della topografia e di una carta dell'uso del suolo di buona precisione al fine di evitare modellazioni cinematiche prive di significato.

Le simulazioni realizzate, tramite l'applicativo ROTO-MAP, hanno portato all'elaborazione di cinque differenti elaborati:

- Energia cinetica massima
- Energia cinetica media
- Distribuzione dei punti di arresto
- Altezze massime delle traiettorie
- Indice di rischio

### *Energia cinetica massima e media*

Viene calcolata l'energia cinetica massima e media degli scendimenti simulati dei blocchi. Il calcolo delle energie consente di individuare, in fase di progettazione, la posizione più idonea delle opere di protezione necessarie per arrestare i massi.

### *Distribuzione punti di arresto*

Rappresenta la distribuzione dei punti di arresto dei blocchi secondo le traiettorie simulate tarate tenendo opportunamente conto delle evidenze riscontrate in campagna.

### *Altezze massime delle traiettorie di volo*

Rappresenta la distribuzione delle massime altezze raggiunte dai blocchi durante rispettivamente la fase di volo e di rimbalzo; serve per la corretta progettazione di opere paramassi al fine di evitare problemi legati alla sicurezza.

### *Indice di rischio*

Il valore dell'indice di rischio viene ricavato dal prodotto dell'energia cinetica media per la probabilità di

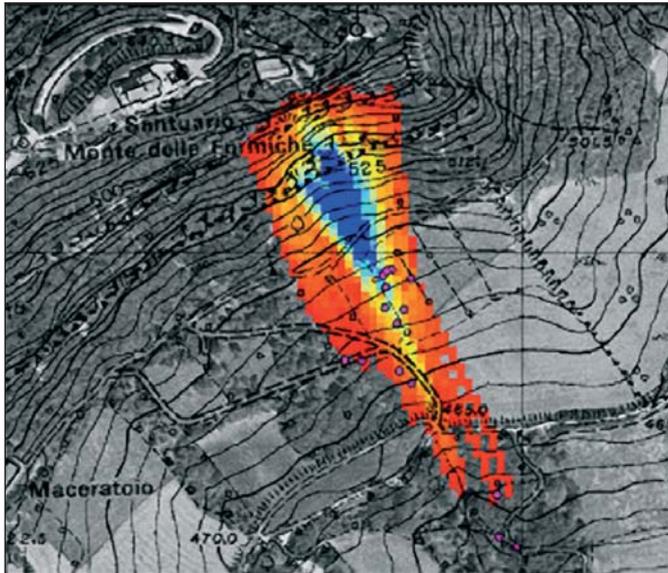


Figura 7g.

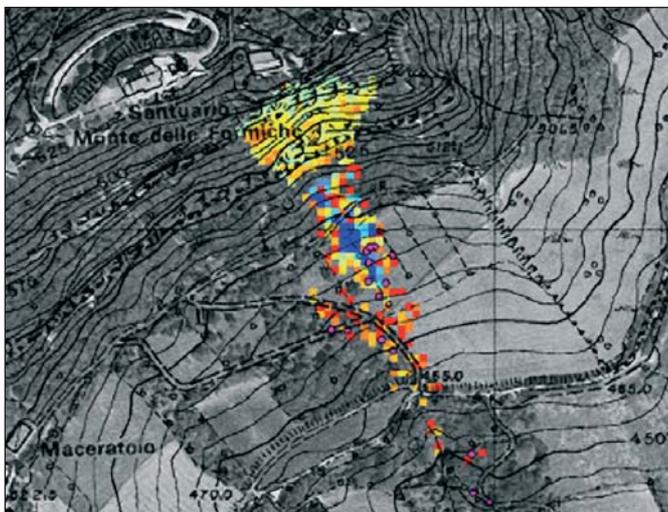


Figura 7h.

distacco (quest'ultimo parametro può assumere valori variabili sulle aree di distacco qualora venga effettuato un rilievo geomeccanico della fatturazione dell'ammasso roccioso). Tale valore viene quindi normalizzato rispetto alla dimensione delle maglie, alla spaziatura tra le maglie di partenze e al numero di scendimenti simulati per ciascun punto di partenza e rappresenta l'energia totale che dovrebbe essere assorbita da un metro lineare di rete paramassi se da ogni metro quadro di area sorgente si distaccasse un blocco di roccia. Sin da queste prime simulazioni si è visto subito che la parte preponderante del deposito del crollo è stata individuata in maniera pressoché uguale rispetto alle evidenze geomorfologiche riscontrate. E' abbastanza evidente come il modo migliore di operare in questi casi è quello di effettuare una analisi statistica studiando un grande numero di scendimenti simulati e attraverso la back analysis andare a tarare i parametri geomeccanici caratteristici del pendio.

L'elaborato ottenuto ha fornito le traiettorie dei percorsi dei blocchi; quest'ultimo è stato molto utile per verificare la congruenza dei punti di arrivo con la posizione dei blocchi reali sul terreno.

## 7. Considerazioni conclusive

Il lavoro svolto è il risultato di una modellizzazione della realtà naturale che è inevitabilmente più complessa. E' stato riscontrato al tempo stesso, che i dati richiesti nella fase di input, rendono il risultato ottenuto sensibile anche a piccole variazioni. In particolare modo due di questi devono essere particolarmente curati, per non ottenere risultati affetti da troppe approssimazioni:

- 1) la ricostruzione della superficie topografica, che è necessario realizzare con adeguato dettaglio, poiché una maglia troppo larga del modello digitale del terreno di partenza fa perdere di precisione il risultato finale;
- 2) la taratura dei coefficienti di restituzione energetica e di attrito, da effettuare attraverso la realizzazione di una carta dell'uso del suolo, poiché l'attribuire erroneamente ad un'area piuttosto che ad un'altra un determinato valore del coefficiente stesso comporta sostanziali cambiamenti nelle traiettorie degli scendimenti dei blocchi.

Risulta comunque necessaria una fase di campagna, dove un rilevamento geologico-geomorfologico dovrà servire sia per ricavare i dati in ingresso sia per la calibrazione e validazione del modello generato ponendo attenzione all'individuazione della scarpata e delle zone di distacco, alle dimensioni dei massi, e soprattutto alla corretta mappatura del detrito di crollo ed eventualmente dei singoli blocchi caduti, necessari per tarare i parametri utilizzati alla realtà riscontrata.

La metodologia qui proposta verrà sviluppata in altri siti significativi regionali allo scopo di individuare le aree in cui vi è una probabilità di propagazione del materiale di crollo e, specularmente, quelle in cui la probabilità risulti marginale o nulla e di migliorare quindi la attuale cartografia.

Ciò permetterà inoltre di costituire una banca dati in grado di offrire un *range* dei valori dei coefficienti geomeccanici utilizzabili a livello regionale dai tecnici professionisti.

## Bibliografia

- BERTOZZI E. & BROILI L. 1978. Considerazioni sui criteri di progettazione delle opere di difesa nei processi di scendimento massi. Mem. Soc. Geol. It. n. 18, 187-195
- FOCARDI P. 1982. Considerazioni cinematiche sul percorso di massi provenienti da frane di crollo. Geologia Tecnica n. 4, 13-23
- GIANI G.P. 1997. Caduta massi. Analisi del moto ed

opere di protezione. Hevelius IBN 88-86977-05-0  
 HUNGR O. & EVANS S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. V Symposium on Landslides, Losanna  
 PARONUZZI P. 1987a: Modelli di calcolo per l'analisi della propagazione di blocchi rocciosi in frana. Rivista Italiana di Geotecnica, XXI n.4, 145-165.  
 PARONUZZI P. 1987b: Rockfall: un programma basic per la simulazione cinematica dei crolli litoidi. Bollettino della Associazione Mineraria Subalpina, XXIV (1 -2), 185-196.  
 PARONUZZI P. 1989a: Studio geomeccanico dei rimbalzi di blocchi mobilizzati da un crollo litoide: la frana di Lavone (Brescia). Atti del Congr. Int. di GeolIngegneria, Politecnico di Torino, 28-30 settembre 1989, Torino, vol. 2, 861-868.  
 PARONUZZI P. 1989b: Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers. Quarterly Journal of Engineering Geology, London, 22,175-183.  
 PARONUZZI P. 1989c: Criteri di progettazione dei rile-

vati paramassi. Geologia Tecnica 1/89,23-41.  
 PARONUZZI P. 1990: La propagazione dei massi sui versanti. Rassegna Tecnica del Friuli- Venezia Giulia, XLI, marzo-aprile 1990, 28-32.  
 PARONUZZI P., COCCOLO A. 1995a: L'impiego delle barriere paramassi. Rassegna Tecnica del Friuli-Venezia Giulia, 4/1995, luglio-agosto 1995, 20-25.  
 PARONUZZI P., COCCOLO A. 1995b: Crollo di progetto e affidabilità delle barriere paramassi. GeolIngegneria Ambientale e Mineraria, vol.86, anno XXXII, n.2-3, giugno-settembre '95, 147-154.  
 PFEIFFER T.J. & BOWEN T. 1989. Computer simulation of rockfall. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 26 (1) 135-146.  
 REGIONE EMILIA-ROMAGNA 1996. Carta Inventario dei Fenomeni Franosi. Autore: M. Pizziolo  
 SCIOLDO G. 1991: ROTOMAP: analisi statistica del rotolamento dei massi. Ass. Min. Subalpina: Atti Convegno "La meccanica delle rocce a piccola profondità", 31 ottobre 1991, Torino, 81-84

## ARCHAEOSURVEY Indagini geofisiche [www.archaeosurvey.it](http://www.archaeosurvey.it) [sanvero@tin.it](mailto:sanvero@tin.it) Dr. Geol. Sandro Veronese gall. B. Bernardino da Feltre 8 45100 Rovigo tel. fax 0425 29133

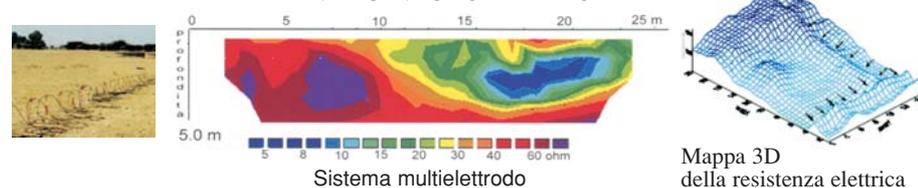
### INDAGINI GEORADAR



### INDAGINI MAGNETICHE



### INDAGINI GEOLETTRICHE



*Interveniamo nei seguenti settori:*  
**INGEGNERIA**  
 Mappatura rete sottoservizi  
 Ricerca cavità Controlli strutturali  
 Indagini del tracciato di strade, canali, ecc. ...  
**AMBIENTE**  
 Indagini su aree dismesse, siti industriali, ecc.  
 Delimitazione di aree inquinate  
 Ricerca di discariche abusive  
 Ricerca di contenitori interrati metallici e non  
 Studio preliminare di siti da adibire a discarica  
**ARCHEOLOGIA**  
 Indagini di aree sottoposte a vincolo  
 Mappatura di manufatti sepolti (fondazioni, mura, tombe, cunicoli, cripte, ecc...)  
 Indagini all'interno di chiese, edifici storici, ecc...  
**GEOLOGIA / IDROGEOLOGIA**  
 Indagini su corpi di frana  
 Indagini stratigrafiche  
 Indagini aree destinate a grandi insediamenti  
 Ricerca di falde acquifere  
 Verifica ingressione marina in aree costiere