

**INDIVIDUAZIONE CON METODI GIS DELLE ASTE
TORRENTIZIE SOGGETTE A COLATE DETRITICHE:
APPLICAZIONE AL BACINO DELL'ALTO AVISIO
(TRENTO)**

**GIS-based identification of debris-flow dominated channels:
application to the upper Avisio Basin (Trento)**

Marco Cavalli¹, Silvio Grisotto²

Sommario

In questo lavoro si descrive una semplice e rapida procedura semi-automatica di identificazione, a scala regionale, delle aste torrentizie potenzialmente soggette a colate detritiche. La procedura, implementata in ambiente GIS, è basata sull'analisi di mappe *raster* morfometriche, derivate da una rappresentazione digitale del terreno. I siti di potenziale inizio del processo di colata detritica sono identificati sulla base di una relazione tra pendenza locale e area contribuente, mentre semplici soglie di pendenza locale sono state utilizzate per l'individuazione delle zone di propagazione, rallentamento ed arresto. La procedura prevede inoltre l'analisi del profilo delle aste torrentizie per la determinazione, in via preliminare, della potenziale distanza di arresto di una colata detritica.

Summary

The paper focuses on a simple and fast semi-automated procedure that has been developed for a regional-scale identification of debris-flow prone channels. This GIS-based methodology is based on the analysis of morphometric maps derived by means of a Digital Elevation Model. Potential initiation sites of debris flows are identified by a relationship between local slope and contributing area, while deposition, deceleration and stop cells are derived from simple thresholds of local slope. In order to predict the run-out distance of debris-flows, an analysis of channels profile is also implemented in the procedure.

¹ *Assegnista di Ricerca presso il CNR IRPI di Padova e dottorando in Idronomia Ambientale, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova*

² *Libero professionista, Gruppo INGEOFOR (www.ingeofor.it) – Collaboratore del Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento*

1. Introduzione

I processi torrentizi che si verificano nei bacini alpini lungo la rete idrografica minore presentano un grande potere distruttivo per la rapidità, l'intensità e la difficile prevedibilità con la quale accadono. Lo studio delle cause predisponenti e delle condizioni di innesco ed evoluzione dei fenomeni, è di fondamentale importanza per la prevenzione del rischio ad essi connesso.

In particolare, le colate detritiche sono processi torrentizi comuni nei piccoli bacini montani. Questa forma di movimento in massa, costituito da acqua, sedimento e materiale organico di diversa dimensione, rappresenta una delle minacce più significative per numerosi valli alpine, anche a causa dell'intenso sviluppo urbano e della rete viaria, soprattutto a scopo turistico, occorso negli ultimi decenni. Pertanto, l'individuazione preliminare delle aste torrentizie con caratteristiche di potenziale criticità per il verificarsi di colate detritiche rappresenta un passaggio fondamentale nell'ambito della valutazione della pericolosità e, di conseguenza, per una migliore programmazione degli interventi di mitigazione del rischio ad esse collegato, in zone abitate o di conoide. Le colate possono coinvolgere aree distanti dai siti d'innesco e, nel caso di aree urbanizzate, causano solitamente danni ad infrastrutture e, nel peggiore dei casi, anche la perdita di vite umane. I metodi che identificano i possibili siti d'innesco devono essere, quindi, completati da metodi che predicano anche le zone di deposito (Benda e Cundy, 1990). L'analisi delle zone di pericolo da colata detritica può essere effettuata a diverse scale spaziali.

A scala di singolo bacino, per l'individuazione delle aree che possono essere raggiunte dalle colate detritiche in conoide, si ricorre solitamente all'applicazione di due approcci: l'analisi storico-geomorfologica e la modellazione matematica. Il primo tipo di analisi rappresenta uno strumento d'indagine per la delimitazione delle aree esposte a pericolo in termini di inviluppo degli effetti degli eventi avvenuti in passato. Tra questi metodi si ricorda il metodo proposto da Aulitzky (1994), che sulla base di indicatori di campo, i cosiddetti testimoni muti, conduce ad una classificazione qualitativa della pericolosità in zona di conoide. La notevole influenza degli eventi passati ed il fatto di non tener conto degli interventi di sistemazione idraulica e dei mutamenti delle condizioni d'uso del suolo sono i limiti maggiori di questo tipo d'approccio. In alternativa al metodo storico-geomorfologico è possibile utilizzare modellazioni numeriche di sviluppo di una colata detritica, fra le quali si può ricordare il noto codice di calcolo FLO 2D (O'Brien *et al.*, 1993). Questo tipo di applicazioni necessita di una base topografica accurata e di un notevole numero di dati di *input* come i valori dei parametri reologici e l'idrogramma d'ingresso.

A scala spaziale più ampia, le zone di pericolo da colata detritica possono essere indagate con metodologie quali l'analisi di dati storici, utili specialmente dove sono stati registrati danni, fotointerpretazione ed osservazioni di terreno e modellazione spazialmente distribuita volta ad identificare i possibili punti d'innesco e le aree interessate dal deposito della colata. In quest'ultima metodologia d'analisi si inserisce anche la procedura implementata in GIS proposta in questo studio della quale si illustreranno metodi ed applicazione al bacino dell'alto Avisio in provincia di Trento.

2. Area di studio

L'area oggetto del presente studio è l'alto bacino dell'Avisio (212 km²) (Fig. 1) con sezione di chiusura in corrispondenza dell'abitato di Moena, scelto come zona campione in quanto già coperto da una cartografia morfometrica e geomorfologica di base ben dettagliata, e per le importanti implicazioni socio-economiche che la perimetrazione delle zone di pericolo da colata detritica può avere in tale ambito, caratterizzato da un forte sviluppo antropico legato soprattutto all'attività turistica.

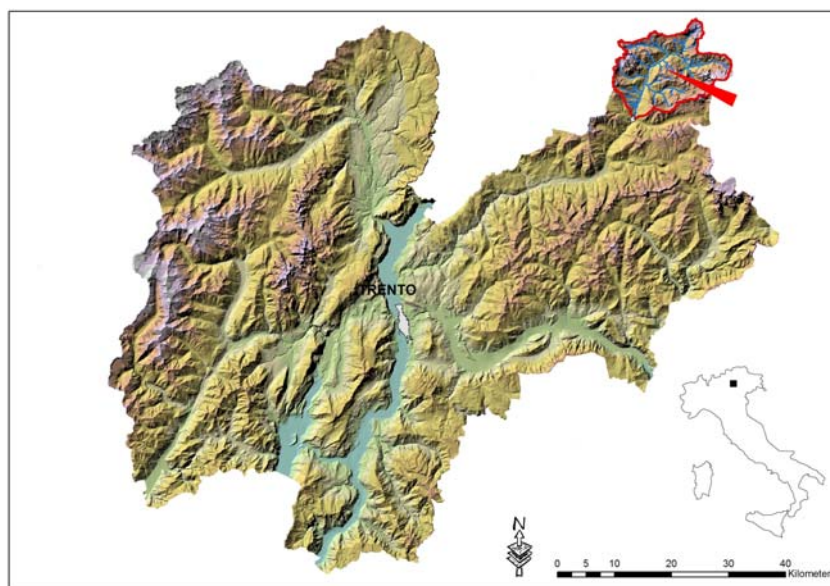


Fig. 1 – Inquadramento geografico del bacino dell'alto Avisio (Trento)

Fig. 1 – Location map of the upper Avisio basin (Trento)

L'area rappresenta la classica tipologia di bacino dolomitico, caratterizzato dall'alternanza regolare di imponenti testate rocciose, falde detritiche, praterie e pascoli d'alta quota, boschi di conifere e numerose zone di conoide più o meno densamente antropizzate. Tutta l'area si colloca ad una quota superiore ai 1150 m s.l.m. ed è caratterizzata da un valore elevato della pendenza media (64%) dovuto alla presenza dei massicci dolomitici del Sella, Sassolungo, Catinaccio e Marmolada.

Il regime pluviometrico del bacino si può considerare di tipo quasi continentale, con netto massimo di precipitazioni in estate (luglio-agosto). Proprio le precipitazioni estive, caratterizzate da elevata intensità e breve durata, sono una delle principali cause d'innesco delle colate detritiche.

3. Metodologia di indagine

3.1 DEM e reticolo sintetico

Come è noto, la base informativa fondamentale per l'analisi morfometrica del terreno e per tutte le elaborazioni idrologiche che conducono all'estrazione di un

reticolo sintetico come risultato finale è rappresentata dal modello digitale delle elevazioni (DEM). Per questo studio si è fatto uso di un DEM con maglia 10 m x 10 m, che rappresenta un soddisfacente compromesso fra il dettaglio richiesto per l'analisi della rete idrografica che implica l'uso di *raster* con celle di piccole dimensioni, e la superficie relativamente ampia delle aree di studio a cui questa procedura fa riferimento. Per determinare in modo più accurato i percorsi di drenaggio ed in special modo quelli facenti capo ai corsi d'acqua minori, solitamente i più soggetti a fenomeni di colata detritica, è opportuno creare il livello informativo delle *blue lines* ricavate dalla cartografia di base. Il *layer* delle *blue lines* è utile sia per guidare la direzione di deflusso verso la topologia del reticolo idrografico standard che per un successivo controllo visivo con il reticolo sintetico generato. Rappresentate nelle *blue lines* sono anche quelle incisioni che solcano i versanti senza avere sbocco su corsi d'acqua maggiori che vanno tenute comunque in considerazione poiché, in occasione di eventi meteorici intensi, possono creare situazioni di pericolosità enfatizzata dalla mancanza di una direzione preferenziale del deflusso nelle parti inferiori. Le mappe *raster* morfometriche richieste per l'estrazione e l'analisi della rete idrografica (direzioni di deflusso, area drenata e pendenza locale) sono state ottenute dal DEM previa rimozione delle depressioni locali. L'algoritmo adottato per la rappresentazione delle direzioni di deflusso assume un ruolo chiave nel calcolo dell'area contribuyente e della pendenza locale dal DEM (Dalla Fontana e Marchi, 2003). In questo studio si è optato per il metodo classico *single flow* (D8) che privilegia la descrizione delle situazioni topografiche di concentrazione del flusso rispetto a quelle di dispersione, individuando in modo univoco la connessione tra le celle che compongono la *grid* del DEM.

Secondo diversi autori (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Desmet *et al.*, 1999) parametri topografici che combinano l'area contribuyente e la pendenza locale sono in grado di identificare, nel modello digitale del terreno di un bacino, i possibili punti di inizio dei collettori che costituiscono la rete idrografica. Marchi e Dalla Fontana (2005), analogamente ad altri studiosi (e.g., Wilson e Gallant, 2000), hanno adottato un indicatore, per il quale una base fisica può essere ricercata nel concetto di *stream power* (Ω):

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \quad (1)$$

Dove ρ è la densità dell'acqua, g l'accelerazione gravitazionale, Q la portata e S la pendenza locale. Assumendo la radice quadrata dell'area drenata (A) come surrogato della portata hanno formulato un indice di stream power (*SPI*) su base topografica:

$$SPI = A^{0.5} S \quad (2)$$

Gli elementi del DEM che ricadono all'interno di aree di convergenza topografica e che hanno un *SPI* che eccede un certo valore di soglia identificano potenziali punti di inizio dei canali. *SPI* rappresenta un valido indicatore del controllo esercitato dai fattori topografici sull'intensità potenziale dei processi d'erosione e di trasporto del sedimento e per questo motivo è stato preferito al classico metodo della soglia costante per l'estrazione del reticolo.

3.2 Individuazione dei possibili punti d'innescio delle colate detritiche

Diversi sono i fattori che influiscono sulla dinamica del sedimento lungo il reticolo idrografico ma certamente un ruolo fondamentale è attribuibile all'assetto topografico del terreno. La morfologia esprime infatti la presenza di un gradiente energetico necessario per l'attivazione di processi di trasporto. In particolare, area contribuyente e pendenza locale possono essere considerate rispettivamente come indici del potenziale verificarsi di una concentrazione di deflusso e della potenzialità erosiva dello stesso.

L'estrazione dei possibili punti di innescio di colata è stata effettuata sulla base di una relazione tra pendenza locale e area contribuyente derivata empiricamente da Zimmermann *et al.* (1997) a partire da diversi eventi di colata in Svizzera (Wichmann and Becht, 2005):

$$S = 0.32 \cdot A^{-0.2} \quad (3)$$

dove S è la pendenza locale (m/m) e A l'area contribuyente (km^2). Le celle classificate come potenziale innescio devono eccedere questa soglia (Fig. 2)

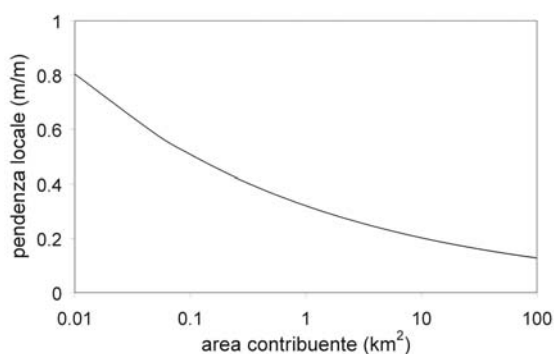


Fig. 2 – Relazione tra pendenza locale e area contribuyente per l'individuazione dei possibili punti di innescio delle colate detritiche

Fig. 2 – Relationship between local slope and contributing area for the identification of debris flow initiation sites

Questo approccio trova fondamento nel fatto che, in presenza di sedimento disponibile per essere mobilizzato, l'innescio di una colata detritica canalizzata dipende dal superamento di valori critici di portata liquida e pendenza del canale. La relazione inversa fra area e pendenza esprime il concetto che nei canali a più forte pendenza è sufficiente per l'innescio una portata liquida inferiore rispetto a canali con valori di pendenza meno elevati. Per quanto riguarda la disponibilità di sedimento, nel presente studio si è assunto che per valori di pendenza locale maggiori di 38° , valore prossimo all'angolo di attrito interno caratteristico di materiali detritici spesso presenti nelle zone d'inizio delle colate detritiche in ambito alpino, la quantità di materiale detritico mobilizzabile sia modesta o trascurabile e quindi tali aree sono state escluse dalle possibili zone d'innescio di colata.

Valori elevati dell'area drenata sono solitamente associati a processi di trasporto solido al fondo ed in sospensione, non all'innescio di colate detritiche.

Queste ultime possono, come è noto, interessare anche bacini di dimensioni piuttosto ampie (indicativamente, salvo casi particolari, fino a 10-15 km²) ma si originano solitamente in corrispondenza di aree contribuenti decisamente minori. Si è ritenuto che una soglia di area contribuente pari a 10 km² possa ritenersi ampiamente cautelativa. L'imposizione di questa soglia nella determinazione delle celle di possibile innesco permette inoltre di eliminare gli artifatti creati dalle elaborazioni come, ad esempio, possibili punti d'innesco individuati in prossimità di grandi sbarramenti trasversali lungo i corsi d'acqua maggiori.

3.3 Classificazione della rete idrografica

Per classificare la rete idrografica in relazione alla pericolosità da colata detritica, una volta individuati i possibili punti d'inizio del fenomeno, è necessario determinare le zone del reticolo propense al deposito del materiale trasportato. Una colata può iniziare a depositare il materiale trasportato per valori di pendenza di circa 6°-10° mentre si arresta solitamente per valori attorno ai 3°-5° (Vandre, 1985; Benda 1985). Si ritiene che soglie critiche di pendenza locale di 3° per l'arresto ed 8° per l'inizio del deposito possano ritenersi una scelta cautelativa per le finalità pianificatorie di questo lavoro. Ogni *pixel* del reticolo sintetico è classificato nel seguente modo:

- possibile punto d'innesco: nel caso sia superata la soglia critica della (3);
- rallentamento: quando la pendenza locale del *pixel* è compresa tra 3° e 8°;
- arresto per pendenze locali del *pixel* inferiori ai 3°;
- propagazione per le restanti celle del reticolo.

3.4 La distanza d'arresto

Il reticolo classificato in base ad innesco, propagazione, rallentamento e deposito non descrive però in maniera esauriente la fenomenologia della colata detritica lungo tutte le aste torrentizie. Aste torrentizie con un andamento longitudinale complesso, con alternanza quindi di zone di innesco, propagazione, rallentamento e arresto non risultano infatti di semplice interpretazione. Non è raro in natura trovare torrenti caratterizzati da punti d'innesco nella parte superiore del reticolo e zone a minor pendenza a monte del conoide in grado di arrestare un'eventuale colata detritica. Profili longitudinali caratterizzati da pendenze che non consentono l'arresto della colata per tutto il suo percorso certamente sono indice di situazioni che richiedono maggior attenzione riguardo alla determinazione della pericolosità rispetto a corsi d'acqua che presentano lungo il loro profilo aree topograficamente propense alla deposizione del materiale solido della colata. Pertanto, la procedura prevede un'analisi del profilo longitudinale volta ad individuare la distanza di arresto della colata detritica.

Uno dei problemi di maggior interesse nello studio della pericolosità da colata detritica è proprio la stima della distanza d'arresto. Tra i molti approcci empirici proposti in letteratura una formula che rappresenta il miglior compromesso tra semplicità e affidabilità è derivata da uno studio di Vandre (1985) in cui la distanza d'arresto è data da:

$$W = \alpha \Delta h \quad (4)$$

Dove W è la distanza d'arresto, Δh è la differenza di quota tra il punto di innesco e il punto in cui inizia la fase di deposizione e α una frazione derivata empiricamente. Secondo i dati di Vandre (1985) il valore di α è di 0.4 (cioè la distanza di arresto equivale al 40% della differenza di quota tra l'innesco e l'inizio della deposizione).

Un criterio per il calcolo della distanza di arresto basato empiricamente sull'eq. 4 proposto da Burton e Bathurst (1998) determina l'arresto della colata quando:

$$\left(\begin{array}{l} \text{distanza percorsa su pendenze} \\ \text{comprese tra } 4^\circ \text{ e } 10^\circ \end{array} \right) > 0.4 \cdot \left(\begin{array}{l} \text{perdita di quota su} \\ \text{pendenze } > 10^\circ \end{array} \right) \quad (5)$$

in cui le distanze sono misurate lungo il canale.

La traiettoria potenziale della colata detritica ha inizio con un punto di innesco e segue il reticolo idrografico fino al suo eventuale arresto. Le regole applicate per il controllo del trasporto e della deposizione del sedimento sono le seguenti:

- per pendenze maggiori di 10° , la colata prosegue nel suo movimento;
- per pendenze comprese tra 4° e 10° la colata si arresta quando supera la distanza d'arresto (eq. 4);
- per pendenze inferiori ai 4° la colata si arresta incondizionatamente e deposita tutto il materiale rimanente.

L'approccio proposto da Burton e Bathurst (1998) è stato applicato tenendo conto dei criteri stabiliti per la classificazione del reticolo idrografico precedentemente illustrati, ritenuti maggiormente cautelativi. Per l'inizio della fase di deposizione si è dunque utilizzata una soglia di pendenza locale pari a 8° . Non è stata inoltre prudenzialmente considerata la condizione di arresto incondizionata (pendenze inferiori ai 3°). L'eq. 5 è stata così modificata:

$$\left(\begin{array}{l} \text{distanza percorsa su} \\ \text{pendenze } < 8^\circ \end{array} \right) > 0.4 \cdot \left(\begin{array}{l} \text{perdita di quota su} \\ \text{pendenze } > 8^\circ \end{array} \right) \quad (6)$$

L'analisi del profilo non è stata effettuata per le aste torrentizie che non presentavano potenziali punti d'innesco di colate detritiche oppure nel caso in cui lungo il reticolo erano individuate zone di probabile inizio di colata ma non punti di rallentamento o arresto. Ovviamente, in quest'ultimo caso, un'eventuale colata detritica non troverebbe condizioni morfologiche favorevoli ad un suo arresto.

3.5 Densità dei punti d'innesco

Un' indicazione di tipo areale che arricchisce l'informazione puntuale delle celle del DEM individuate come possibile innesco di colata detritica può essere fornita da una mappa di densità. Una mappa della densità dei potenziali punti di innesco delle colate detritiche è stata ottenuta mediante un *tool* di ArcGis basato sul concetto di *Kernel Density* (ESRI, 2004). Attorno ad ogni punto, mediante una funzione statistica (*quadratic kernel function* descritta da Silverman, 1986), si adatta una superficie uniformemente distribuita di forma circolare. Il valore della superficie è più alto in corrispondenza del punto e diminuisce con l'aumentare della distanza

dal punto fino a raggiungere il valore nullo alla distanza corrispondente al raggio d'indagine assegnato. La densità di ogni cella è calcolata sommando i valori di tutte le superfici che interessano il centro della cella stessa.

4. Analisi dei risultati e discussione

La procedura applicata al bacino dell'alto Avisio ha condotto all'individuazione di 15.919 potenziali punti d'innescò da colata detritica con una maggiore concentrazione nei corsi d'acqua con bassi valori di area contribuyente ed elevata pendenza locale (Fig. 3a). Il reticolo sintetico del bacino oggetto di studio utilizzato per filtrare i possibili punti d'innescò di colata detritica è stato estratto imponendo un valore di soglia di *SPI* pari a 80 m. Il valore di soglia è stato individuato confrontando i reticoli sintetici estratti con diversi valori soglia con le *blue lines* desunte e digitalizzate dalla Carta Tecnica Provinciale 1:10000.

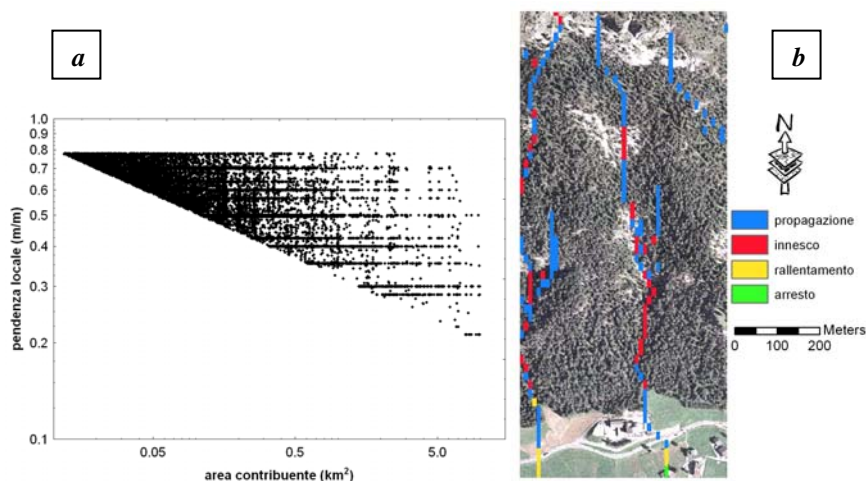


Fig. 3a – Scattergramma tra pendenza locale e area drenata dei possibili punti di innescò di colata nel bacino dell'alto Avisio.

Fig. 3a – Scatterplot of local slope versus contributing area of potential debris flow initiation sites in the high Avisio basin.

Fig. 3b – Mappa raster della procedura in un anonimo corso d'acqua interessato da una colata detritica nell'agosto 2005.

Fig. 3b – Raster map of the procedure in an anonymous stream affected by a debris flow in August, 2005.

Sulla base del reticolo sintetico classificato dalla procedura (Fig. 3b) è stato possibile individuare le intersezioni di quest'ultimo con gli elementi a rischio del territorio ed ottenere allo stesso tempo un'informazione relativa alla tipologia della probabile dinamica dell'evento in quel determinato punto. I livelli informativi degli elementi a rischio, nel caso del bacino dell'alto Avisio, sono costituiti da viabilità principale, viabilità forestale e particelle edificiali. Ciascuna mappa degli elementi a rischio è stata incrociata con il reticolo classificato. I punti di intersezione sono riportati in tabella 1.

Tab. 1 - Punti di intersezione della rete idrografica classificata con gli elementi a rischio.

Tab. 1 - Intersection points between the classified network and at risk elements.

	propagazione	innesco	rallentamento	arresto	totale
particelle edificiali	217	2	175	97	497
viabilità principale	203	17	74	34	328
viabilità forestale	415	51	83	40	589

Dai dati riportati in tabella si nota che le particelle edificiali intersecano in soli due punti porzioni del territorio corrispondenti a possibili punti d'innesco delle colate. La maggior parte delle intersezioni con il reticolo sintetico delle aree edificate avviene, come deducibile dall'ubicazione in zone pianeggianti delle stesse, in porzioni di canali in cui i processi di rallentamento ed arresto sono preponderanti. La situazione è diversa per quanto concerne la viabilità. In particolar modo si nota un elevato numero di punti riconducibili a zone d'innesco lungo la viabilità forestale uniformemente distribuiti nel bacino. Ogni punto di interesse può essere oggetto di uno studio particolareggiato a partire dall'estrazione del bacino contribuyente e del profilo del corso d'acqua a monte.

La procedura è stata utilizzata per assegnare una priorità di indagine a 175 conoidi alluvionali rilevati nel bacino dell'alto Avisio dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento. Mediante la (6) è stata calcolata la distanza di arresto per tutte le aste torrentizie situate a monte dei conoidi. La classificazione della priorità d'analisi dei conoidi (Fig. 4) ha seguito il criterio riportato in tabella 2.

Tab. 2 - Classificazione della priorità d'analisi dei conoidi.

Tab. 2 - Classification of the alluvial fans analysis priority.

Priorità	Distanza d'arresto
ALTA	- Non c'è arresto della colata - Arresto oltre il primo terzo del conoide
MEDIA	- Arresto entro il primo terzo del conoide
BASSA	- Arresto prima del conoide - Nessun punto d'innesco

Il calcolo della distanza di arresto della colata è stato effettuato prendendo in considerazione le sistemazioni esistenti, quindi utilizzando, ove necessario, il profilo dell'asta torrentizia dopo le sistemazioni e non quello estratto direttamente dal DEM in quanto rappresentativo solamente delle condizioni naturali.

La mappa di densità dei potenziali punti d'innesco delle colate detritiche (Fig. 5) è stata creata utilizzando un raggio d'indagine di 50 m scelto per restringere l'analisi ai punti localizzati lungo la stessa asta torrentizia. La suddivisione in 2 classi mediante il metodo statistico *natural breaks* (Jenks e Caspall, 1971) permette di individuare una soglia critica di circa 6.8 punti d'innesco per ettaro. Valori di densità che superano i 6.8 punti d'innesco per ettaro rientrano nella massima classe di densità. La mappa di densità può fornire importanti informazioni per una gestione forestale più attenta agli aspetti idrogeologici. Ad esempio, alle particelle forestali che ricadono all'interno della classe di maggiore densità potrebbe essere assegnata una funzione protettiva. Anche una più attenta ubicazione delle strade forestali potrebbe ricadere negli ulteriori possibili riflessi applicativi della mappa di densità.

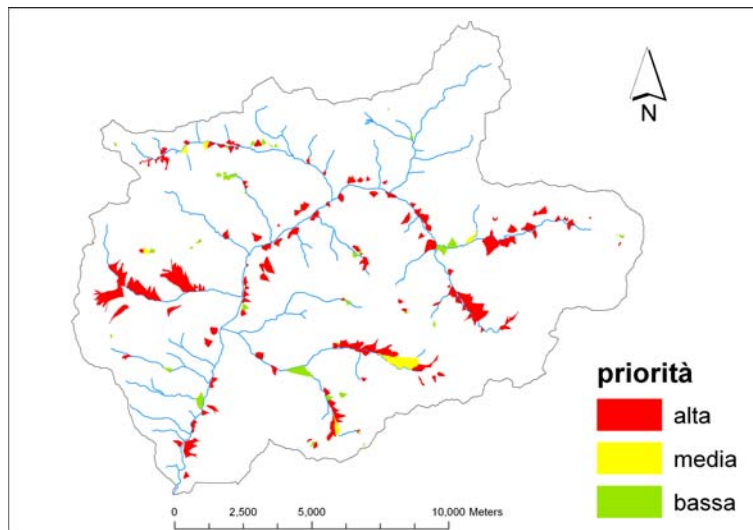


Fig. 4 - Mappa della priorità d'analisi dei conoidi rilevati nell'area di studio
 Fig. 4 - Priority of analysis map for the surveyed fans in the study area

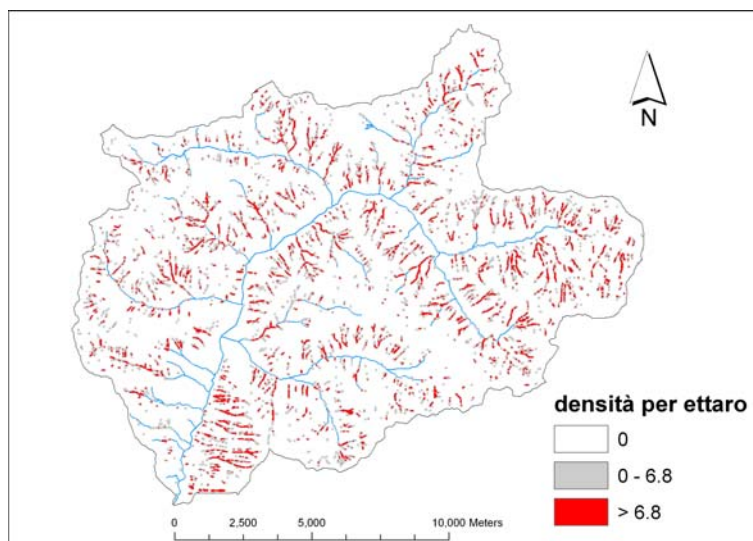


Fig. 5 - Mappa della densità dei punti di innesco delle colate detritiche dell'area di studio.
 Fig. 5 - Density map of the study area debris flow initiation sites.

5. Considerazioni conclusive

L'applicazione della procedura al bacino dell'alto Avisio ha confermato l'utilità di uno strumento veloce e di semplice utilizzo per un'analisi preliminare dei corsi d'acqua potenzialmente soggetti a colate detritiche a partire dalla sola rappresentazione digitale del terreno. In questa procedura si considera il ruolo svolto dalla topografia nell'innescio e nell'evoluzione della colata detritica, mentre non

vengono presi esplicitamente in esame fattori quali la disponibilità di sedimento, i volumi e le caratteristiche reologiche della colata che dovranno comunque rientrare negli studi di maggior dettaglio per la delimitazione delle aree di pericolo. L'utilizzo di una base dati morfologica più accurata, come quella derivata dai sempre più diffusi rilievi LIDAR e la formulazione della (3) su base regionale mediante l'analisi degli eventi di colata detritica occorsi nel territorio oggetto di studio, potranno rappresentare importanti sviluppi per una migliore validazione della procedura.

Ringraziamenti

Si ringraziano il dott. Lorenzo Marchi per la rilettura critica del testo ed i tecnici del Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento per aver fornito la base dati dell'area di studio. Questo lavoro è stato svolto nell'ambito di un incarico di collaborazione tecnica tra il Servizio Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento ed il CNR-IRPI di Padova.

Bibliografia

1. Aulitzky H. (1994): *Hazard mapping and zoning in Austria: methods and legal implications*, Mountain Research and Development, 14 (4), 307-313.
2. Benda L.E. (1985): *Behaviour and effect of debris flows on streams in the Oregon Coast Range*. In: Delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards in Utah. Edited by Bowels D.S., Utah Water Research Laboratory, Logan, Utah, 153-162.
3. Burton A., Bathurst J.C. (1998): *Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale*. Environmental Geology, 35 (2-3), 89-99.
4. Dalla Fontana G., Marchi L. (2003): *Slope-area relationships and sediment dynamics in two alpine streams*. Hydrological Processes, 17, 73-87.
5. Desmet P.J.J., Poesen J., Govers G., Vandaele K. (1999): *Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies*. Catena, 37, 377-392.
6. ESRI (2004). *ArcGis 9.0*, Redlands, California.
7. Jenks G.F. and Caspell F.C. (1971): *Error on Choroplethic Maps: Definition, Measurement, Reduction*. Annals of the Association of American Geographers, 61 (2), 217-244.
8. Marchi L., Dalla Fontana G. (2005): *GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins*. Environmental Geology, 48, 218-228.
9. Montgomery D.R., Foufoula-Georgiou E. (1993): *Channel network source representation using digital elevation models*. Water Resources Research 29, 3925-3934.
10. O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. (1993): *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119 (2), 244-261.
11. Silverman, B.W. (1986): *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, New York.

12. Vandre B.C. (1985): *Rudd Creek debris flow*. In: Delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards in Utah. Edited by Bowels D.S., Utah Water Research Laboratory, Logan, Utah, 117-131.
13. Wichmann V., Becht M. (2005): *Modelling of Geomorphic Processes in an Alpine Catchment*. In: Atkinson, PM, Foody, GM, Darby, SE & F. Wu: *GeoDynamics*, 151-167.
14. Wilson J.P., Gallant J.C. (2000): *Digital terrain analysis*. In : *Terrain analysis: principles and applications*. Edited by Wilson J.P., Gallant J.C., Wiley, New York, 1-27.
15. Zimmermann M., Mani P., Gamma, P., Gsteiger P., Heiniger, O., Hunziker, G. (1997): *Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz (Debris flow hazard and climate change – a GIS based approach)*. Schlussbericht NFP 31, Zurich (in tedesco con sommario in inglese).