

## AZIONE 3

**Definizione di una metodologia per la valutazione della pericolosità dei versanti in relazione a processi inerenti la coltre superficiale, impiegando parametri idrologici, geotecnici e morfologici e da sperimentarsi in alcuni bacini campione**

---

Contributo dei partner italiani:

Ferruccio FORLATI, Stefano CAMPUS,  
Barbara CORAGLIA, Ermes FUSETTI  
Regione Piemonte - Settore Studi e Ricerche Geologiche -  
Sistema Informativo Prevenzione Rischi

Rocco PISPICO, Herbert SAPRI,  
CSI-Piemonte - Settore Controllo Ambiente - Area Sistema  
Informativo Prevenzione Rischi Naturali

Claudio SCAVIA, Marta CASTELLI  
Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Gianni MORTARA, Franco GODONE  
C.N.R. - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Bacino Padano

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio BEATRIZOTTI, Andrea BULETTI,  
Laura FOGLIA, Barbara SINCICH  
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana -  
Istituto Scienze della Terra



### III-1. PREMESSA

Scopo dell'Azione 3 è la messa a punto di metodologie per la valutazione della propensione all'instabilità dei versanti in un bacino idrografico, in relazione ai processi di mobilitazione della coltre superficiale. Si tratta di fenomeni, modesti per sviluppo areale ed entità dei volumi coinvolti, che avvengono in occasione di eventi pluviometrici intensi e possono rivelarsi molto pericolosi.

Gli studi condotti, a forte connotazione multidisciplinare, hanno affrontato il problema sia dal punto di vista scientifico sia dal punto di vista gestionale fornendo utili strumenti operativi nel campo della prevenzione. Il presente lavoro è stato condotto collegialmente da un gruppo di specialisti italiani e svizzeri aventi esperienze simili e al tempo stesso complementari nel campo dello studio della stabilità dei versanti ed in particolare:

- per gli specialisti italiani il momento caratterizzante del progetto è consistito nella messa a punto di una metodologia capace di valutare il grado d'instabilità di versanti di un più esteso territorio in ambiente alpino;
- gli specialisti svizzeri hanno definito una metodologia che consente di valutare, a livello puntuale, le condizioni di stabilità e l'evoluzione del fenomeno eventualmente innescatosi.

Per tale motivo, il testo è stato articolato in due sezioni dedicate ai due diversi approcci di valutazione dell'instabilità dei versanti:

1. zonazione di un territorio in ambiente alpino (contributo italiano);
2. analisi di situazioni locali (contributo svizzero).

### III-2. FRANE SUPERFICIALI

Questa tipologia di processi, noti in letteratura come *shallow landslide* o *soil slip*, si sviluppa con maggior frequenza in ambiente prealpino ed in zone collinari, coinvolgendo per lo più limitate porzioni di terreni non coerenti della copertura superficiale che le acque di infiltrazione hanno portato alla saturazione. La particolare pericolosità di questi fenomeni è da mettere in relazione non solo con la loro rapidità di sviluppo e con la difficoltà di prevederne l'ubicazione, ma anche con l'elevata densità di distribuzione dei singoli fenomeni, le cui traiettorie di discesa sul versante hanno così una notevole probabilità di interferire con aree antropizzate.

Durante l'ultimo secolo in Piemonte quasi il 50% delle vittime causate da dissesti di versante sono

dovute a frane superficiali.

Con il termine *mobilitazione delle coperture detritiche* si intende, a volte in modo imperfetto, sia il fenomeno franoso in senso stretto, sia la successiva evoluzione, peraltro non sempre presente, di trasferimento degli accumuli nella rete idrografica minore, determinando l'innescò o l'esaltazione dei fenomeni di trasporto in massa.

In occasione di particolari condizioni meteorologiche, porzioni di terreno superficiale si staccano dagli strati più addensati sottostanti, o dal tetto del substrato roccioso sul quale giacciono e, muovendosi su una superficie in genere sub-planare, traslano verso il basso evolvendo a volte in colata.



 Figura III-1. Esempio di frana superficiale

Le frane superficiali sono generalmente caratterizzate da:

- spessori limitati (da qualche decina di centimetri fino a 100÷150 cm);
- volumi molto modesti (da qualche metro cubo a qualche centinaio di metri cubi, più raramente > 1000 m<sup>3</sup>);
- elevata densità di singoli fenomeni per unità di superficie (140 frane/km<sup>2</sup>, in Carnia nel settembre 1983; circa 160 frane/km<sup>2</sup> nelle Langhe piemontesi nel novembre 1994);
- frequente tendenza alla coalescenza delle nicchie di distacco e/o degli accumuli (aggregazione anche di diverse decine di singole frane);
- frequente trasferimento degli accumuli nella rete idrografica minore (quindi innescò e/o esaltazione dei fenomeni di trasporto in massa);
- rapidità di evoluzione che può essere considerata pressoché istantanea (da qualche decina di secondi a qualche minuto);

- elevata velocità di movimento: prove su modello fisico (Fukuoka *et al.*, 1977) portano a stabilire velocità sino a 15 m/s;
- elevato impatto distruttivo con gli edifici (figura III-2): 4 vittime a Serravalle Scrivia (AL) nell'ottobre 1977, 18 vittime a Tresenda (SO) nel maggio 1983, 11 vittime a Tartano (SO) nel luglio 1987, 14 vittime a Varallo Sesia (VC) nel novembre 1994;
- elevate distanze percorse dalla massa mobilitata: spesso la massa mobilitata si deposita oltre il piede del versante percorrendo ampi tratti pianeggianti;
- fattori innescanti imputabili a severi eventi meteorologici caratterizzati da piogge spesso protratte nel tempo e con elevati valori di intensità oraria;
- assenza di indizi premonitori;
- azione morfogenetica scarsamente incisiva sull'assetto originario dei versanti;
- scarsa probabilità di riattivazione nel medesimo luogo di precedente innesco, ma alta probabilità di accadimento di nuovi fenomeni in aree immediatamente adiacenti;
- pendenza media dei versanti coinvolti compresa nell'intervallo  $18 \div 45^\circ$ ;
- coinvolgimento di settori di versante generalmente privi di vegetazione d'alto fusto, più frequentemente a prato/pascolo o, in zone collinari, a vigneto o frutteto. Per la coltivazione di queste ultime colture si è diffusa l'usanza di terrazzare il pendio e proprio in corrispondenza dell'orlo di questi gradini sono frequentissimi i casi di innesco di frane.

A fronte di una manifesta pericolosità è singolare che a queste frane non sia stata quasi mai associata un'adeguata memoria storica. Rare sono le descrizioni, e tanto più le rappresentazioni cartografiche, di eventi alluvionali che hanno tenuto nella dovuta considerazione le frane che interessano i terreni superficiali. Il motivo di questa scarsa attenzione può forse derivare dalla constatazione che i versanti, quando coinvolti da questa tipologia di frane, rimangono sostanzialmente integri. Pertanto il ricordo di quanto successo svanisce in breve tempo, al pari della traccia delle frane per naturale, rapida obsolescenza della nicchia di distacco e dell'accumulo o, più di frequente, per il rimodellamento indotto dalle pratiche colturali, specie in ambiente collinare (figura III-3).



Figura III-2. Edificio travolto da una colata rapida nel bacino del Torrente Melezzo Orientale, con una vittima (agosto 1978, foto CNR-IRPI)



Figura III-3. Rete stradale intercettata da frane (Langhe piemontesi, novembre 1994, foto CNR-IRPI)

A titolo di informazione, si riporta un elenco di eventi avvenuti nell'ultimo cinquantennio nel bacino padano, recente quello dell'ottobre 2000 (non dimenticando, in altre parti d'Italia, i disastri della Versilia nel 1996 e di Sarno nel 1998), peculiari per le numerosissime frane superficiali, spesso con pesante tributo di vite umane:

- Biellese orientale, novembre 1951 e 1968;
- Pinerolese, maggio 1977;
- Alessandrino meridionale, ottobre 1977;
- Val Vigizzo, agosto 1978;
- Langhe e Valsesia, novembre 1994;
- Valle d'Aosta, ottobre 2000.

### III-3. ZONAZIONE DI UN TERRITORIO IN AMBIENTE ALPINO

Come già specificato, lo scopo dello studio consiste nella predisposizione di una metodologia per la zonazione di una porzione di territorio in settori aventi diversa propensione all'instabilità e nella messa a punto di strumenti operativi di salvaguardia e gestione del territorio.

Particolare attenzione è stata rivolta all'utilizzo della metodologia in campo previsionale, per la predisposizione di scenari pre-evento in funzione dei valori di pioggia attesa forniti dal Settore Meteorologico e Reti di Monitoraggio della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione (Regione Piemonte).

È stata scelta una specifica area campione nella quale tarare e verificare la metodologia predisposta.

### III-4. SETTORE DI INDAGINE

È stata scelta come area di indagine la testata del bacino del torrente Melezze Orientale in alta Val Vigezzo (Val d'Ossola, Alpi Lepontine). La valle costituisce da sempre un'importante via di comunicazione tra il territorio elvetico e quello italiano grazie alla particolare conformazione geomorfologica.

La Val Vigezzo ha una direzione circa E-O ed è impostata lungo la linea tettonica Centovalli, attiva anche nel Quaternario.

L'asse vallivo della Val Vigezzo è attraversato da uno spartiacque effimero che separa i bacini dei torrenti Melezze Occidentale e Melezze Orientale drenanti rispettivamente verso l'Italia e verso la Svizzera. Tale caratteristica morfologica ha favorito in passato fenomeni di inversioni di drenaggio dei due torrenti. Il torrente Melezze Orientale, la cui testata è collocata a nord dell'asse vallivo, sbocca nella valle principale presso l'abitato di Santa Maria Maggiore: da qui la direzione di deflusso varia e il corso d'acqua defluisce verso est in territorio elvetico dove confluisce nel torrente Isorno.

L'area indagata (figura III-4) è compresa all'interno dei limiti comunali di Toceno, Santa Maria Maggiore e, in minima parte, Craveggia. La distribuzione altimetrica dell'area varia da 2466 m s.l.m. (Pizzo la Scheggia), a circa 1000 m s.l.m. (punto di chiusura del bacino).

La testata del Torrente Melezze Orientale si presenta come un ampio anfiteatro rivolto verso sud con un sistema drenante di forma radiale in cui i rii e i torrenti convergono nei pressi del punto di chiusura del bacino.

Le forme e i depositi legati al modellamento glaciale (cordoni morenici, rocce montonate, till di ablazione, till di allogamento, depositi di contatto

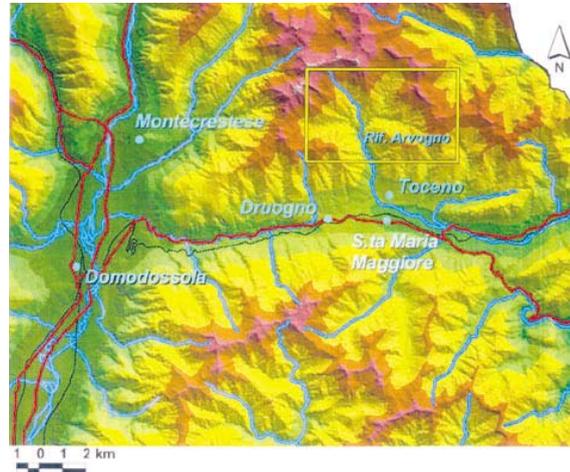


Figura III-4. Inquadramento dell'area di indagine

glaciale, depositi fluvio-glaciali, depositi glacio-lacustri, ecc.), sono in questo settore diffusi e ben conservati, e testimoniano la presenza nel Quaternario di importanti masse glaciali. Sono inoltre diffusi depositi e forme di origine gravitativa (detriti di falda e frane di crollo alle quote superiori, frane di mobilizzazione rapida della coltre superficiale alle quote inferiori). Il paesaggio risulta inoltre fortemente influenzato dalla dinamica fluviale recente: i corsi d'acqua principali scorrono all'interno di valli strette e molto incise che testimoniano un approfondimento fluviale molto accentuato. È probabile che l'attività neotettonica della linea Centovalli abbia svolto un ruolo importante nel determinare l'assetto geomorfologico attuale dell'area indagata, interagendo in particolare con la morfodinamica fluviale e glaciale.

Il substrato cristallino pre-quaternario è rappresentato dagli gneiss a grana fine a muscovite e biotite, appartenenti all'unità del Monte Leone (Pennidico Inferiore). La giacitura della scistosità è all'incirca costante in tutta l'area indagata con immersione verso SE di poche decine di gradi. Lo gneiss si presenta tabulare, listato, talora molto fratturato specie in corrispondenza delle discontinuità tettoniche principali.

### III-5. EVENTO ALLUVIONALE DEL 7-8 AGOSTO 1978 IN VAL D'OSSOLA (PIEMONTE)

Il 7-8 agosto masse d'aria fredda di origine atlantica, venute a contatto con aria calda e umida a sud

delle Alpi, diedero luogo a precipitazioni di intensità eccezionale (figura III-5). Esse dapprima investirono il tronco intermedio della Valle d'Aosta, l'alta Val Sesia e successivamente il medio bacino del Toce, colpendo con particolare intensità la Val Vigezzo ed esaurendosi quindi nella valle del Melezzo Orientale, in territorio svizzero. I caratteri idrologici dell'evento (Tropeano *et al.*, 1999) possono così sintetizzarsi:

- al pluviografo di Larecchio, le altezze di pioggia misurate furono 58 mm/1h, 134 mm/3h, 230 mm/24h;
- al pluviografo di Domodossola, le altezze di pioggia misurate furono 50 mm/1h (tempo di ritorno 47 anni), 138 mm/3h (tempo di ritorno oltre 100 anni), 233 mm/24h;
- il rovescio di massima intensità si ebbe nel pomeriggio del 7 agosto e alle 18 i tributari di destra del Melezzo Occidentale erano in massima piena.

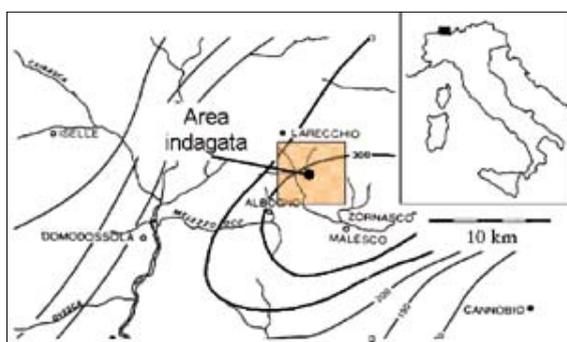


Figura III-5. Isoiete (mm/24h) del 7 agosto 1978 (Anselmo 1979)

In tutte le valli più colpite si riscontrò una generale interdipendenza tra i processi d'instabilità sui versanti e i processi torrentizi di tipo parossistico lungo la rete idrografica di ordine inferiore. Persistenti accumuli detritici alla testata di impluvi (coltri eluvio-colluviali), destabilizzati per il rapido incremento delle acque di ruscellamento e d'infiltrazione, spesso concorsero in misura determinante all'esaltazione delle pulsazioni di piena, con la creazione di sbarramenti temporanei ai deflussi concentrati nelle incisioni.

Numerosi furono i danni causati sia dall'attività fluviale e torrentizia sia dai processi di versante. Nell'area coinvolta furono danneggiati venti edifici, molti centri abitati rimasero isolati a causa della distruzione di trenta ponti e per i danni causati a linee di comunicazione.

Carattere peculiare dell'evento fu l'elevata concentrazione di frane avvenute a scapito della coltre

superficiale (figura III-6); in particolare nel dominio di studio una frana superficiale evolutasi in una *mud-debris flow* e denominata "frana del caminetto" (figura III-2) causò una vittima.



Figura III-6. Foto aerea in cui sono visibili gli effetti dell'evento alluvionale del 1978 (Volo post alluvione Ossola agosto 1978)

### III-6. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Valutare la propensione all'instabilità dei versanti per un determinato ambito territoriale significa verificare, per ogni elemento in cui è stata discretizzata l'area in esame, le condizioni di stabilità o di instabilità.

Tale risultato è raggiungibile mediante l'impiego di un modello in grado di cogliere gli aspetti fondamentali dei fenomeni indagati, basato su variabili e parametri di facile derivazione. La fase più delicata dell'intero procedimento operativo è rappresentata dalla scelta del modello semplificato che, oltre a rispondere alle esigenze più prettamente gestionali, deve essere applicabile ai più diversi contesti.

Per un'efficace gestione delle informazioni relative ad un settore territoriale più o meno vasto è possibile ricorrere alle tecniche GIS (*Geographic Information System*) che consentono una strutturazione logica della base dati in strati informativi indipendenti. In tal modo, le basi tematiche contenenti informazioni georiferite possono essere messe in relazione tra loro impiegando gli operatori spaziali GIS.

Per la predisposizione di scenari relativi a fenomeni strettamente dipendenti da eventi meteorologici, è opportuno operare mediante l'accoppiamento di un modello di instabilità dei versanti con la previsione meteorologica. L'approccio

proposto è particolarmente adatto a questo impiego in quanto, come si vedrà in seguito, include un termine idrologico in cui tali grandezze devono essere specificate.

### III-7. PROPOSTA METODOLOGICA

L'analisi è normalmente condotta attraverso le seguenti fasi consequenziali:

1. analisi delle condizioni al contorno e scelta del modello;
2. individuazione delle unità territoriali di riferimento;
3. valutazione dei parametri di ingresso;
4. discretizzazione del dominio secondo una griglia di elementi (celle quadrate) con dimensioni predefinite e creazione del DTM (*Digital Terrain Model*);
5. derivazione delle variabili topografiche e idrologiche;
6. attribuzione ad ogni cella dei valori corretti per tutti i parametri;
7. valutazione dell'instabilità di ogni cella per un livello di pioggia infiltrata assegnato;
8. interpretazione e verifica dei risultati.

La strategia impiegata per la conduzione del progetto è stata la seguente:

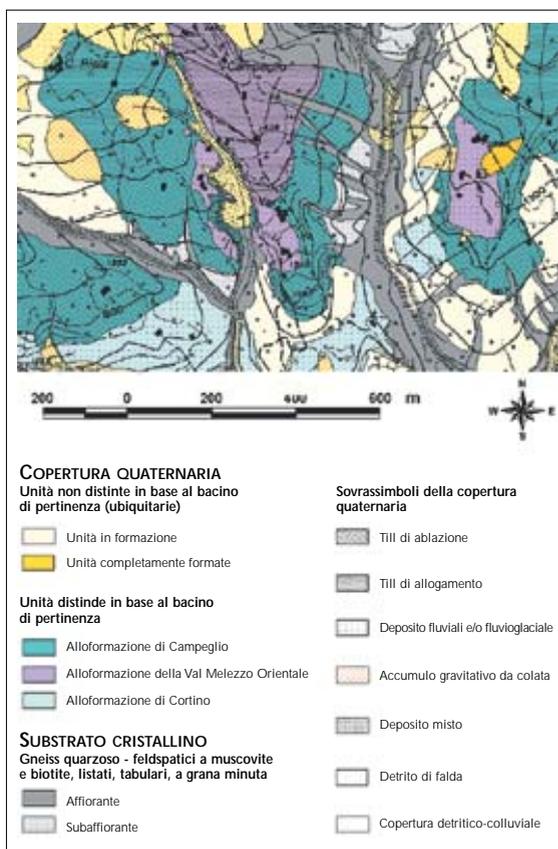
- utilizzo di un modello consolidato ed affidabile;
- valutazione dell'applicabilità del modello ad un contesto territoriale alpino;
- ricorso alle tecniche GIS per la strutturazione dei dati in ingresso in strati informativi;
- contributo multidisciplinare (geologia, pedologia, ingegneria geotecnica, ecc.);
- affinamento delle fasi di scelta ed acquisizione dei parametri di ingresso, per i quali si considera una variabilità spaziale legata al grado di dettaglio del rilevamento;
- verifica delle capacità previsionali del metodo tramite confronto dei risultati ottenuti con gli effetti conseguenti a eventi alluvionali significativi (Evento alluvionale del 7-8 agosto 1978 in Val Vigizzo).

Tutte le discipline coinvolte hanno contribuito alle indagini finalizzate alla definizione dei dati di ingresso, attraverso le fasi e i prodotti intermedi esaminati in seguito.

#### III-7.1. Rilevamento geologico del Quaternario

Ha permesso di ricostruire l'evoluzione geologico-geomorfologica recente dell'area di studio. I caratteri litologici, geomorfologici e stratigrafici, sintetizzati nelle carte di terreno, costituiscono il supporto di base fondamentale per la conduzione delle successive indagini. In particolare è stato eseguito un rilevamento di un'area di circa 16 km<sup>2</sup> e sono state realizzate una Carta Geomorfologica secondo le linee guida della Carta Geomorfologica d'Italia e una Carta delle Formazioni Quaternarie utilizzando il metodo Allostratigrafico (NACSN 1983) alla scala 1:10.000 (figura III-7).

Figura III-7. Stralcio della Carta delle Formazioni Quaternarie (dal rilevamento alla scala 1:10.000)



#### III-7.2. Rilevamento pedologico

Ha avuto come obiettivo la definizione delle unità elementari di riferimento e la stima dei valori di alcuni parametri di ingresso per il modello meccanico-idrologico. Tale obiettivo è stato

raggiunto attraverso più fasi di lavoro: inizialmente è stata realizzata una Carta dell'Uso del Suolo secondo la legenda CORINE (1994) (figura III-8); sono state individuate le principali tipologie pedologiche e sono state condotte indagini finalizzate alla valutazione dei parametri fisici, tra cui l'esame di profili pedologici (figura III-9).

In una seconda fase, attraverso l'incrocio dei dati geomorfologici, geologici e pedologici, è stata realizzata la Carta Pedologica. Il territorio in esame è stato suddiviso in 97 unità elementari di riferimento (figura III-10) appartenenti a 12 unità ambientali (aree relativamente omogenee dal punto di vista pedo-paesaggistico). A ciascuna unità ambientale, benché caratterizzata da una variabilità sia in direzione verticale (presenza di più orizzonti in ciascun suolo) sia orizzontale (presenza di più suoli in ogni unità), è stato attribuito un valore costante per ciascun parametro fisico-meccanico. Il problema della variabilità spaziale delle grandezze considerate all'interno di ogni unità ambientale è stato superato attraverso l'attribuzione del valore considerato più favorevole all'innesco dei fenomeni franosi superficiali e/o del valore medio ponderato. Ad esempio, per ciò che riguarda la permeabilità, inizialmente è stato attribuito a ciascun suolo il valore



Figura III-9. Esame di un profilo pedologico

dell'orizzonte meno permeabile; successivamente è stato calcolato per ciascuna unità ambientale il valore medio ponderato delle permeabilità dei suoli potenzialmente instabili presenti con diversa frequenza all'interno dell'unità stessa.

Figura III-8. Carta dall'Uso del Suolo secondo la metodologia CORINE

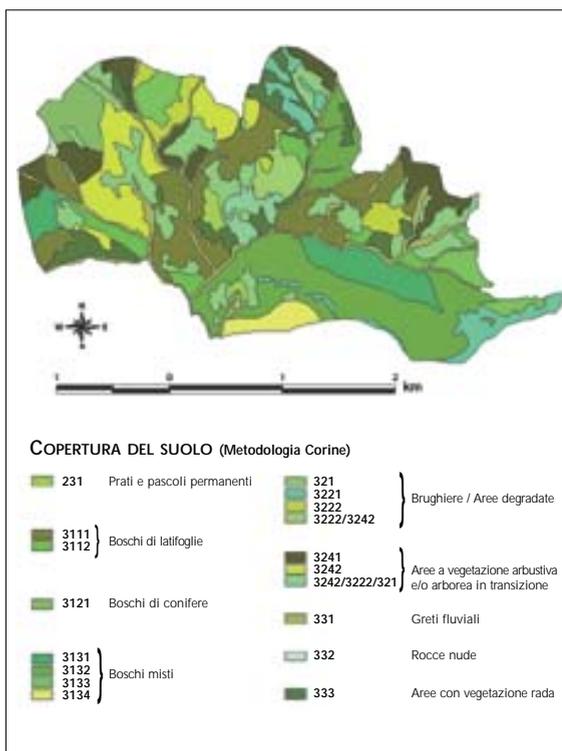
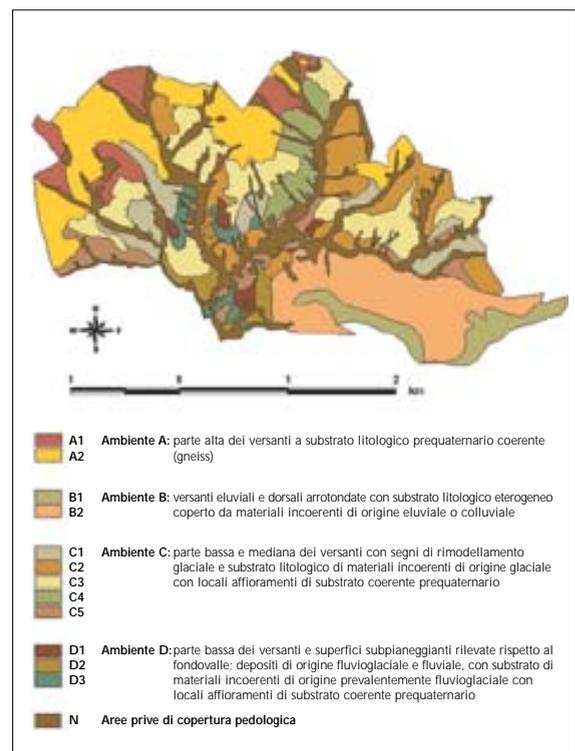


Figura III-10. Carta pedologica: suddivisione dell'area di indagine in unità di terreno elementari e ambientali



### III-7.3. Classificazione geotecnica

Su 129 campioni disturbati sono state eseguite analisi granulometriche per setacciatura e sedimentazione. Indipendentemente dal tipo di deposito considerato, si tratta di materiali ghiaioso-sabbiosi con presenza (generalmente debole) di fine (passante al setaccio 200 ASTM). In figura III-11 è riportata a titolo di esempio la curva granulometrica di un campione prelevato dalla coltre superficiale detritica.

Sulla frazione fine di 2 campioni sono state eseguite prove di taglio diretto drenato su provini ricostituiti (lato 60 mm, altezza 20 mm), i cui risultati sono riportati in Tabella III-1.

L'insieme dei risultati ottenuti ha consentito una stima sufficientemente accurata dei parametri meccanici e di confermare le indicazioni fornite dalle osservazioni di terreno per i parametri fisici (peso di volume e conducibilità idraulica).

	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]
Picco	15.3	38.2
Residuo	10.0	35.8

Tabella III-1. Risultati delle prove di taglio diretto sulla frazione fine

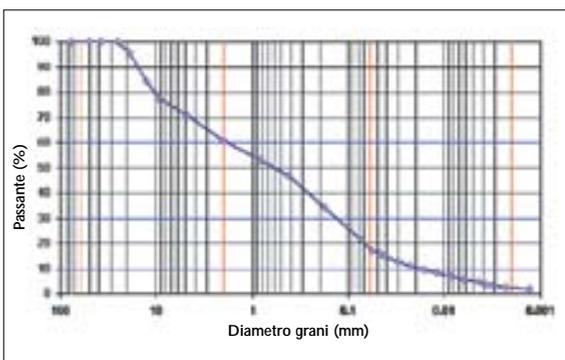


Figura III-11. Curva granulometrica di uno dei campioni prelevati nella copertura pedogenizzata

### III-7.4. Modello digitale del terreno (DTM)

A partire dai punti quotati estratti dai livelli vettoriali delle curve di livello della C.T.R. 1:10.000 sono state create due griglie: una a maglia 20 m e una a maglia 10 m. I modelli digitali del terreno da essi ottenuti hanno fornito l'indispensabile supporto

per la derivazione delle variabili topografiche ed idrologiche introdotte nel modello meccanico-idrologico. In figura III-12 è riportata una vista assonometrica del DTM a maglia 20 m relativo alla C.T.R. 052020 "Melezzo Orientale".

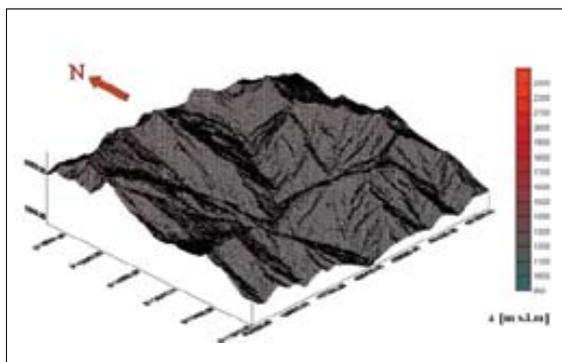


Figura III-12. Vista assonometrica del DTM a maglia 20 m.

### III-7.5. Evento alluvionale dell'agosto 1978: il quadro del dissesto

Lo studio è consistito nell'analisi a posteriori del quadro del dissesto al fine di ricavare utili indicazioni in chiave previsionale.

È stata messa a punto una specifica metodologia per il rilevamento dei processi d'instabilità dei versanti e di caratterizzazione dei materiali coinvolti. Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- fotointerpretazione;
- rilevamento di terreno;
- analisi statistica e caratterizzazione dei processi.

Tutte le informazioni raccolte (550 frane cartografate di cui 276 descritte tramite una scheda specifica) sono state informatizzate e georiferite al fine di costruire una base dati apposita.

Tale modalità operativa ha permesso l'analisi statistica (circa 5800 dati) di diverse caratteristiche (parametri geometrici, morfometrici, orizzonti coinvolti, tipologia, ecc.), individuando le situazioni predisponenti l'innescio dei processi di instabilità della coltre superficiale e di valutare la reale applicabilità del modello meccanico-idrologico. Inoltre, la georeferenziazione ha reso possibile la realizzazione dello strato informativo dei dissesti rilevati (figura III-14), utilizzato nella successiva fase di valutazione dei risultati ottenuti.

### III-7.6. Il modello di Montgomery e Dietrich

Il modello utilizzato (Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich & Montgomery, 1998) accoppia un modello idrologico ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite. Le principali assunzioni alla base della formulazione sono:

- pendio infinito;
- piano di scivolamento e tavola d'acqua paralleli rispetto al versante;
- piano di scivolamento coincidente con il contatto tra colluvium e substrato;
- flusso stazionario sub-superficiale;
- assenza di drenaggio profondo e flusso nel substrato.

In particolare, quando l'altezza dello strato saturo,  $h$ , cresce (figura III-13), la tensione normale efficace sul piano di scivolamento diminuisce e, di conseguenza, diminuisce anche la resistenza al taglio disponibile.

Il rapporto  $h/z$ , (aliquota di colonna di terreno saturata) per una determinata altezza di pioggia, viene correlato (1):

- al fattore idrologico  $q/T$  che descrive la *magnitudo* della precipitazione, rappresentata da  $q$ , relativa alla capacità del sottosuolo di smaltire l'acqua verso valle (i.e. la trasmissività);
- al fattore topografico  $a/(b \sin \theta)$ , che rappresenta gli effetti essenziali della topografia sul deflusso delle acque meteoriche:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \sin \theta} = W \quad (1)$$

I termini che compaiono nella (1) sono:

- $z$  = spessore della coltre superficiale;
- $q$  = pioggia netta infiltrata nel terreno;
- $T = K \cdot z \cdot \cos \theta$  = trasmissività idraulica saturata;
- $K$  = conducibilità idraulica saturata;
- $a$  = area di drenaggio;
- $b$  = larghezza della sezione di deflusso;
- $\theta$  = inclinazione del versante.

Al fine di ottenere un'equazione che includa anche il modello di stabilità viene adottata la classica formulazione (Skempton & De Lory, 1957) che considera pendio infinito con filtrazione parallela al terreno, in unione al criterio di resistenza al taglio alla Mohr-Coulomb, espresso in termini di tensioni efficaci:

$$F = \frac{c' + (\gamma \cdot W \cdot g_w) \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

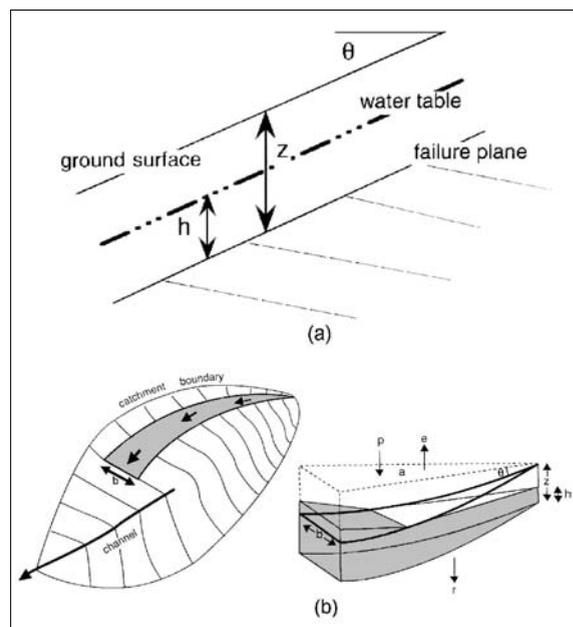
in cui:  $F$  è il fattore di sicurezza,  $c'$  la coesione,  $\gamma$  e  $\gamma_w$  rispettivamente il peso di volume del terreno

e dell'acqua,  $\phi'$  l'angolo di resistenza al taglio.

I modelli idrologico (1) e di stabilità (2) possono essere combinati, in modo tale da esprimere per ogni cella la condizione di instabilità (3) in funzione dell'area di drenaggio riferita alla larghezza della sezione di deflusso:

$$\frac{a}{b} \geq \left[ \frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi'} \right) \right] \cdot \frac{T}{q} \cdot \sin \theta \quad (3)$$

Figura III-13. Schema del modello meccanico-idrologico impiegato (Dietrich & Montgomery, 1998). (a) Modello di stabilità del versante all'equilibrio limite:  $h$  e  $z$  sono gli spessori dello strato di terreno saturo e della massa potenzialmente instabile, rispettivamente. (b) Vista piana e sezione del versante con riferimento al modello idrologico:  $a$  è l'area di drenaggio,  $b$  la larghezza di deflusso. La pioggia netta infiltrata,  $q$ , è uguale alla precipitazione,  $p$ , meno l'evapo-traspirazione,  $e$ , e il drenaggio profondo,  $r$ .



### III-8. ANALISI E RISULTATI

L'obiettivo della formulazione originaria di Montgomery & Dietrich (1994) era la creazione di un semplice modello non probabilistico in grado di valutare l'influenza della morfologia sull'innescio delle frane superficiali. Per l'utilizzo pratico del modello, quindi, tutti i parametri erano considerati

costanti ed uniformi nell'intero dominio di studio.

In questo lavoro, invece, l'influenza del tipo e dell'uso del suolo sulla stabilità sono stati presi in considerazione e i valori assegnati ai parametri sono funzione di queste caratteristiche. Inoltre, rispetto alla formulazione originaria, il criterio di resistenza al taglio è espresso in termini di coesione ed angolo di resistenza al taglio.

### III-8.1. Variabili topografiche ed idrologiche

Le variabili topografiche ed idrologiche sono state calcolate per mezzo del software GIS ArcView® (ESRI 1998). Un DTM (modello digitale del terreno) è stato generato a partire dai punti misurati e, quindi:

- immersione ed inclinazione del versante;
- direzioni di deflusso;
- aree di drenaggio;
- bacini idrografici

sono stati calcolati con riferimento ad una griglia di maglie quadrate con lato 20 m (totale 15.707 celle) e con lato 10 m (62.749 celle) ai cui centroidi sono stati riferiti tutti i valori.

### III-8.2. Parametri fisico-meccanici

Le analisi di sensitività svolte preliminarmente hanno permesso di valutare il diverso peso di ciascuno dei parametri nella (3). In relazione a tali risultati, ad ogni unità ambientale sono stati assegnati valori dei parametri valutati in accordo con i seguenti criteri:

- spessore della coltre superficiale ( $z$ ). Dal rilevamento dei dissesti e dall'indagine pedologica è stato valutato lo spessore dei materiali potenzialmente instabili;
- peso di volume del terreno saturo ( $\gamma$ ): da letteratura (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991; Montgomery & Dietrich, 1994);
- coesione ( $c'$ ): da prove di taglio diretto su provini ricostituiti ottenuti dalla frazione fine del materiale prelevato *in situ*. Inoltre, è stato valutato il contributo legato alla presenza della vegetazione secondo informazioni reperite in letteratura (Turner, 1996);
- angolo di resistenza al taglio ( $\phi'$ ): dai risultati di prove di taglio diretto su provini ricostituiti ottenuti dalla frazione fine del materiale prelevato *in situ*, integrati da informazioni reperite in lettera-

tura (Montgomery & Dietrich, 1994) e dalla classificazione granulometrica svolta sui campioni prelevati *in situ* (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991);

- conducibilità idraulica satura ( $\kappa$ ): dall'indagine pedologica (§ 7.2). I valori individuati sono in accordo con quelli relativi alle medesime classi granulometriche riportati in letteratura (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991).

Al fine di valutare la capacità del modello di prevedere l'innesco di frane superficiali, sono stati considerati tre livelli di dettaglio nella valutazione dei parametri, sintetizzati in Tabella III-2.

Il *set I* rappresenta l'applicazione del modello così come proposto da Montgomery & Dietrich (1994): per ciascun parametro è stato considerato il valore medio distribuito in maniera omogenea sull'intero dominio.

Nel *set II* si considera una variabilità di  $z$  e  $K$  in accordo ai dati forniti dalle indagini precedentemente descritte; tutti i parametri sono comunque costanti all'interno delle unità elementari di riferimento.

Il *set III* è in pratica un'estensione della situazione precedente, in cui è stato stimato il contributo meccanico alla stabilità dei pendii offerto dalla presenza dei diversi tipi di vegetazione. L'incremento di coesione introdotto è stato valutato in funzione della densità e dell'approfondimento degli apparati radicali in accordo alla Carta di Uso del Suolo riportata in figura III-8.

Set	$c'$ [kPa]	$z$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	$K$ [m/s]
I	5	1	22	38	1.97·10 <sup>-4</sup>
II	5	0.25÷1.06	22	38	5.50·10 <sup>-6</sup> +3.90·10 <sup>-4</sup>
III	5÷20	0.25÷1.06	22	38	5.50·10 <sup>-6</sup> +3.90·10 <sup>-4</sup>

Tabella III-2. Set di parametri utilizzati nelle analisi.  $c'$  è la coesione,  $z$  lo spessore della coltre detritica superficiale,  $\gamma$  il peso di volume del terreno saturo,  $\phi'$  l'angolo di resistenza al taglio,  $K$  la conducibilità idraulica satura

### III-8.3. Descrizione delle analisi

Il primo passo dell'analisi è la valutazione delle capacità di previsione del modello. A tal fine è stato considerato l'evento alluvionale che ha colpito il bacino del Melezzo nel 1978: le frane superficiali verificatesi sono state individuate (tramite foto-interpretazione e rilevamento di terreno), e rappre-

sentate in uno strato informativo che costituisce la "realtà" di riferimento (figura III-14).

Analogamente, lo strato informativo "previsione" per ciascuna analisi è la sintesi del risultato che per ogni singola cella è costituito da una situazione prevista di stabilità o di instabilità, che si può rappresentare mediante carta semaforica (figura III-15). Tutte le zone di affioramento roccioso o di denudamento (il suolo non è più oggettivamente riconoscibile) sono state escluse preliminarmente dall'area di indagine, venendo meno le condizioni per il verificarsi delle instabilità oggetto del presente studio (assenza di coltre superficiale).

Il confronto tra "realtà" e "previsione" (svolto in ambiente GIS mediante un'operazione di *overlay* topologico, in cui vengono considerate le mutue relazioni spaziali di appartenenza ed intersezione tra gli elementi) è uno dei passi fondamentali del lavoro svolto.

Sono stati considerati tre differenti livelli di pioggia netta infiltrata  $q$  (150, 200, 250 mm/24h) compatibili con l'evento meteorologico del 1978.

Figura III-14. Carta dei dissesti osservati

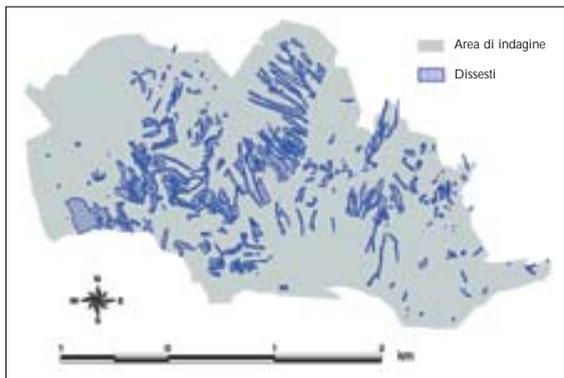
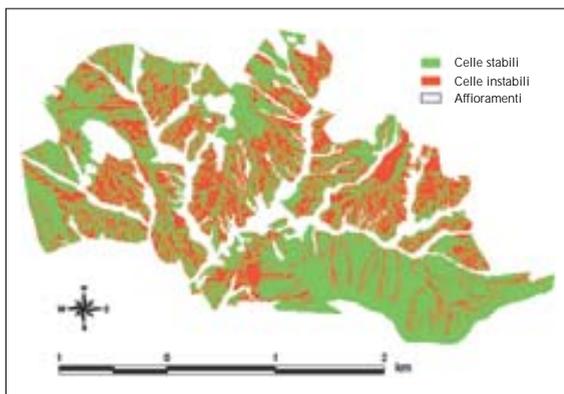


Figura III-15. Carta delle instabilità previste (Set. III,  $q=200$  mm/24h, DTM 10 m)



La valutazione dell'aliquota effettivamente infiltrata, partendo dall'altezza di pioggia caduta al suolo misurata, interpolata (figura III-5) o stimata, è una fase molto delicata. Infatti il valore di  $q$  è influenzato da numerosi fattori quali intensità e durata della pioggia, tipo, utilizzo e umidità iniziale del suolo, vegetazione, ecc. Come valore di primo tentativo, in attesa di migliorare i criteri che portino a tale valutazione, è stato posto  $q$  pari al 75-80% della precipitazione al suolo considerando i tipi di uso del suolo presenti nell'area indagata (Moisello 1985). In base a tali considerazioni,  $q = 200$  mm/24h è il valore maggiormente rappresentativo, a cui nel seguito si farà riferimento.

Naturalmente è necessario un criterio che consenta una valutazione quantitativa della previsione. A tal fine è stata introdotta la "percentuale di successo"  $\Delta$ , definita come rapporto tra il numero di celle correttamente previste dal modello e il numero totale di celle presenti nel dominio. Il criterio adottato è particolarmente severo poiché alla definizione del "successo" concorrono solo le celle per cui si ha una effettiva coincidenza spaziale tra osservazione e previsione.

Set	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]
I	2204	59	5421	45	7625	49
II	2885	78	4683	39	7568	48
III	2467	66	6892	58	9359	60

Tabella III-3. Valutazione della previsione fornita dal modello per  $q = 200$  mm/24h, tramite confronto con i dissesti osservati in 3721 celle; DTM 20 m.

Set	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]
I	4818	45	30.986	59	35.804	57
II	7249	68	25.456	49	32.705	52
III	5781	54	34.579	66	40.360	64

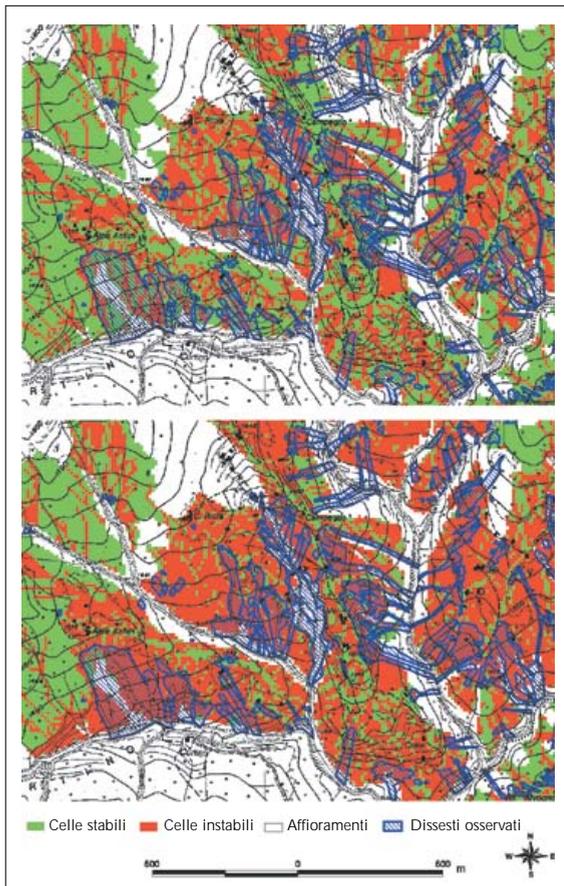
Tabella III-4. Valutazione della previsione fornita dal modello per  $q = 200$  mm/24h, tramite confronto con i dissesti osservati in 10.645 celle; DTM 10 m.

In Tabella III-3 e in Tabella III-4 è riportato (per DTM a maglia 20 m e 10 m rispettivamente) il

numero di celle correttamente previste ed il corrispondente valore di  $\Lambda$ , relativamente a celle instabili, stabili e all'intera area oggetto di studio. Sono sintetizzati i risultati delle analisi svolte considerando i tre diversi set di parametri in corrispondenza di  $q = 200 \text{ mm}/24\text{h}$ . Dal momento che la qualità complessiva della previsione è espressa dal valore  $\Lambda$  totale, risulta immediato che i maggiori sforzi richiesti da una più accurata definizione dei parametri di ingresso (set III) sono giustificati alla luce dei risultati ottenuti, specialmente in considerazione:

- del fatto che il successo non è sensibilmente sbilanciato verso le celle stabili o instabili;
- del risultato molto promettente ottenuto per le zone a vegetazione boschiva (*i.e.* regioni a NO e SE in figura III-15) in cui i dissesti osservati sono estremamente rari e localizzati in corrispondenza delle incisioni dovute al ruscellamento superficiale, peraltro correttamente individuate dal modello.

Figura III-16. Influenza del fattore di sicurezza (particolare 1), set III,  $q = 200\text{mm}/24\text{h}$ , DTM 10 m.  $F = 1$  (in alto);  $F = 3$  (in basso)



### III-8.4. Applicazione di un fattore di sicurezza

Il fattore di sicurezza rappresentato dall'equazione (2) è stato finora considerato pari all'unità. Si ritiene invece che le imprecisioni legate al calcolo delle variabili e soprattutto alla valutazione dei parametri fisico-meccanici introdotti potrebbero essere controbilanciate da un valore  $F > 1$ , secondo la prassi tipica della pratica ingegneristica.

L'analisi per il set III, con  $q = 200\text{mm}/24\text{h}$ , è stata ripetuta ponendo  $F = 3$ . I risultati ottenuti (Tabella III-5 e Tabella III-6) appaiono estremamente interessanti pensando ad un'eventuale applicazione estesa del metodo, che ovviamente ipotizza un'elevata affidabilità nell'individuazione delle celle instabili. La percentuale di successo  $\Lambda$  relativa alle celle instabili cresce significativamente, mentre la qualità complessiva della previsione non viene alterata in maniera sostanziale. In aggiunta a ciò, i dettagli riportati in figura III-16 e in figura III-17 mostrano come il fattore di sicurezza agisca principalmente nelle zone critiche (quelle con elevata diffusione di dissesti osservati), mentre la previsione nelle aree pronosticate stabili (dove solo la rete di drenaggio superficiale viene individuata come instabile dal modello) non è interessata da variazioni di rilievo.

### III-8.5. Osservazioni sui risultati ottenuti

Da un primo esame dei risultati ottenuti emergono le seguenti considerazioni:

1. la "percentuale di successo"  $\Lambda$  pari al 66% per le zone instabili e al 60% complessivo è assolutamente incoraggiante, trattandosi di un modello deterministico;
2. la previsione individua correttamente le zone con propensione al dissesto al di là dei valori  $\Lambda$ ;
3. con il miglior dettaglio disponibile nella fase di valutazione dei parametri (set III), si ottiene la previsione complessivamente migliore, buona sia per le zone instabili sia per quelle stabili;
4. l'utilizzo del fattore di sicurezza migliora la previsione dell'instabilità delle zone critiche senza penalizzare eccessivamente altre aree complessivamente stabili (Tabella III-5, Tabella III-6; figura III-16, figura III-17);
5. l'utilizzo di un DTM a maglia 10 m (derivato sempre dai livelli vettoriali delle curve di livello della C.T.R. 1:10.000) comporta:
  - un maggiore dettaglio nella derivazione delle variabili (immersione, inclinazione e aree di drenaggio);

- una maggiore precisione nella previsione spaziale;
- un modesto aumento della percentuale di successo e della sua qualità, a fronte di una gestione dei dati sensibilmente più impegnativa.

Figura III-17. Influenza del fattore di sicurezza (particolare 2), set III,  $q = 200\text{mm}/24\text{h}$ , DTM 10 m.  
 $F = 1$  (in alto);  
 $F = 3$  (sotto)

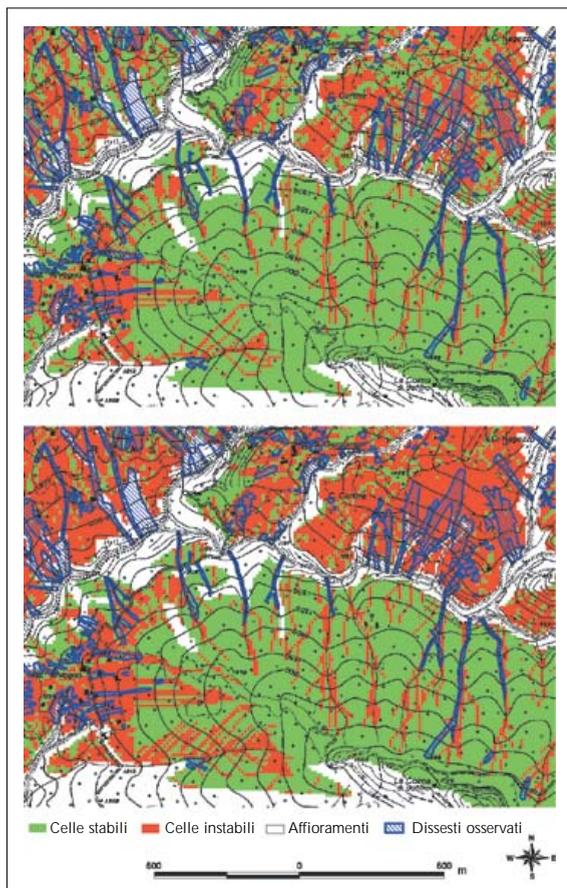


Tabella III-5. Valutazione della previsione fornita dal modello per diversi valori del fattore di sicurezza ( $q = 200\text{ mm}/24\text{h}$ , set III), DTM 20 m.

F	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]
1	2467	66	6892	58	9359	60
3	3015	81	5467	46	8482	54

F	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]	n° corrette	$\Delta$ [%]
1	5781	54	34.579	66	40.360	64
3	8399	79	26.511	51	34.910	56

Tabella III-6. Valutazione della previsione fornita dal modello per diversi valori del fattore di sicurezza ( $q = 200\text{ mm}/24\text{h}$ , set III), DTM 10 m.

### III-8.6. Prime ipotesi di applicazioni pratiche

L'applicazione più immediata del modello e della metodologia utilizzati è l'individuazione degli scenari di innesco sulla base di previsioni meteorologiche quali quelle fornite dai bollettini ufficiali (*i.e.* Settore Meteo-Idrografico della Regione Piemonte). Data un'area di indagine, la procedura che si prospetta può essere sintetizzata nei seguenti punti:

1. predisposizione di tutti gli strati informativi necessari (*i.e.* DTM, variabili, parametri);
2. valutazione della pioggia netta infiltrata  $q$  sulla base della previsione meteorologica;
3. applicazione del modello per ogni cella e definizione dello scenario d'innesco corrispondente (componente spaziale della pericolosità) in tempi estremamente rapidi, benché dipendenti dall'estensione del dominio di indagine;
4. utilizzo del suddetto scenario, unitamente agli altri strumenti disponibili, per eventuali azioni di protezione civile pre-evento.

Tale applicazione, che richiede modesti affinamenti del metodo, è già di per sé motivo di interesse. Ma i valori riportati in Tabella III-3, sebbene incoraggianti, possono essere affinati. In particolare, il solo confronto cella per cella non permette di cogliere la capacità del modello di individuare correttamente i settori di versante aventi una maggiore propensione all'instabilità.

Oltre a ciò, è chiaro che uno dei risultati attesi dall'utilizzo dell'approccio presentato è costituito dalla zonazione della pericolosità. Proprio in questa ottica gli strati informativi dei dissesi osservati e dei risultati ottenuti sono stati rielaborati calcolando la "densità relativa di celle instabili"  $\Gamma$  definita, per ciascuna unità territoriale di riferimento, come rapporto tra il numero di celle instabili e il numero complessivo di celle. L'intervallo di variazione  $0 \leq \Gamma \leq 1$  è stato suddiviso in quattro intervalli di uguale ampiezza e le unità territoriali sono state classificate secondo questo schema. Questa prima macro-zonazione può portare ad una mappa della

componente spaziale della pericolosità come quelle riportate in figura III-18, in cui ad ogni unità elementare è associato per i dissesti previsti (*set* III,  $q=200$  mm/24h,  $F = 1$  ed  $F = 3$ ) e osservati (al fine di valutare il procedimento) l'intervallo di  $\Gamma$  corrispondente.

Si possono definire "a favore di sicurezza" tutte quelle situazioni in cui  $\Gamma_{\text{previsione}} \geq \Gamma_{\text{osservazione}}$ . Ciò si è verificato rispettivamente nel:

- 75% delle unità per  $F = 1$
- 95% delle unità per  $F = 3$

indipendentemente dal DTM utilizzato. Tali risultati testimoniano il buon grado di affidabilità della previsione (si ricorda che il *set* III garantiva la migliore qualità complessiva di previsione) e la particolare adeguatezza verso una zonazione della propensione all'instabilità.

In questa logica, la migliore applicazione della metodologia seguita e degli strumenti utilizzati è quella di un supporto alla pianificazione che

potrebbe consistere in una carta in cui è rappresentata la componente spaziale della pericolosità.

Per un'appropriate valutazione della pericolosità, è necessario definire, accanto a quella spaziale, anche la componente temporale e quella probabilistica. Una possibile procedura per raggiungere tale obiettivo è costituita dai seguenti passi:

1. predisposizione di tutti gli strati informativi necessari (*i.e.* DTM, variabili, parametri);
2. sulla base dei dati idrologici disponibili, valutazione di eventi meteorologici  $p_r$  e dei relativi tempi di ritorno  $T_r$ ;
3. valutazione dell'aliquota  $q_r$  correlata;
4. applicazione del modello per ogni cella e definizione dello scenario d'innescio corrispondente a  $T_r$ ;
5. il ricorso al tempo di ritorno  $T_r$  permette di introdurre le due componenti (tempo e probabilità) necessarie alla valutazione della pericolosità.

### III-9. METODOLOGIA PER L'ANALISI DI SITUAZIONI LOCALI: APPROCCIO SVIZZERO

L'approccio scelto per la soluzione del problema è stato:

- A. caratterizzazione geologico-geotecnica ed idrogeologica dei pendii soggetti a scivolamenti superficiali (Buletti, 1999; Sincich, 1999a);
- B. messa a punto di un modello matematico deterministico in grado di descrivere il sistema reale sia dal punto di vista idrologico sia da quello della stabilità (Sincich, 1999b);
- C. realizzazione di un campo sperimentale volto alla determinazione della quantità di pioggia effettivamente infiltrata nel terreno rispetto a quella piovuta (Buletti & Sincich, 1999);
- D. messa a punto di un modello matematico che descrive il sistema reale considerando i parametri idrologici e geologici da un punto di vista probabilistico (Sincich, 2000a);
- E. valutazione della dinamica del moto dello

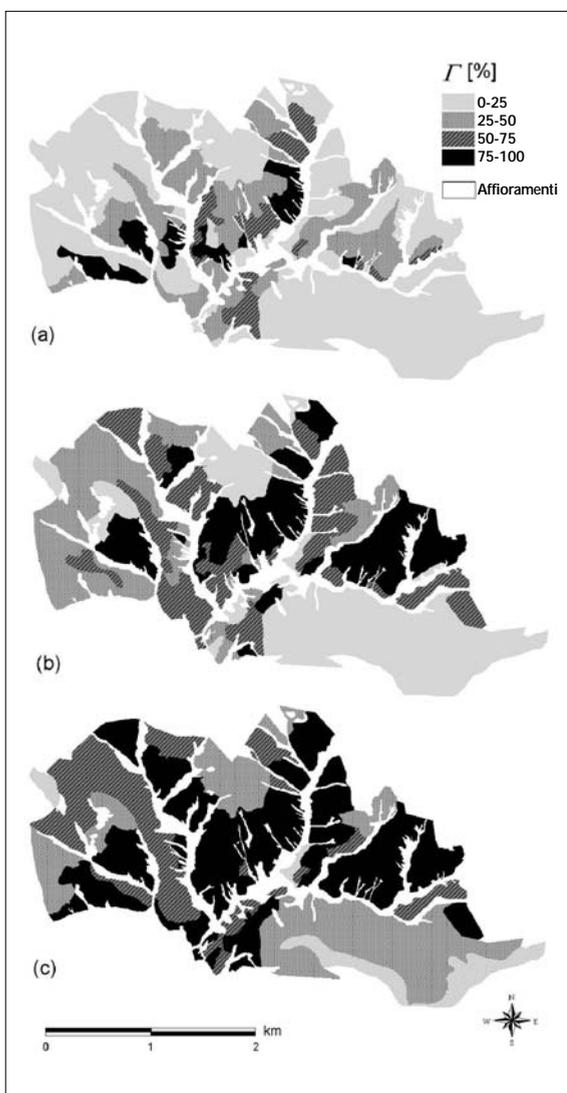


Figura III-18. Macro-zonazione della pericolosità (componente spaziale).  
 (a) Dissesti osservati (rilievo e fotointerpretazione);  
 (b) Previsione: DTM 20 m, *set* III per  $q = 200$  mm/24h e  $F = 1$ ;  
 (c) Previsione: DTM 10 m, *set* III per  $q = 200$  mm/24h e  $F = 3$

scivolamento per poterne stabilire l'energia trasmessa e il conseguente pericolo apportato (Sincich, 2000b).

### III-9.1. Caratterizzazione geologico - geotecnica

Per confrontare i risultati dello studio con un evento realmente accaduto, si è analizzata l'alluvione che nell'agosto del 1978 ha colpito parte della Svizzera italiana causando ingenti danni.

In tale occasione sulle valli di Campo, Centovalli e Onsernone, cadde un quantitativo di acqua superiore al 100% della somma mensile media pluriennale di tutto il mese di agosto e si innescarono diversi *soil slip* che causarono, oltre alla distruzione di diverse abitazioni, anche delle vittime.

Partendo dalla cartografia antecedente l'alluvione e utilizzando le foto aeree a disposizione si sono potuti ricostruire i danni provocati da tale alluvione.

L'analisi si è concentrata sulla Valle di Vergeletto (Buletti, 1999) nella quale sono state svolte le seguenti indagini geotecniche:

- prove penetrometriche dinamiche per stabilire lo spessore della coltre di copertura interessata dallo scivolamento;
- prove di infiltrazione per poter conoscere il valore della conducibilità idraulica;
- determinazione del peso specifico apparente;
- analisi granulometrica completa.

I risultati delle prove penetrometriche ed il confronto degli stessi con una serie di rilievi eseguiti in altre zone hanno permesso di constatare come in tutto il Cantone lo strato superficiale del terreno, quello compreso tra 0 e  $0.40 \div 0.80$  m, presenti delle caratteristiche meccaniche simili e in particolare una densità relativa molto ridotta. La causa di questo può essere cercata o nella giovane età dei depositi o, più probabilmente, nell'azione di gelo e disgelo oltre che nelle variazioni termiche giornaliere e stagionali. Questa situazione, che sembra valere per i terreni non coesivi predominanti lungo le alpi ticinesi, comporta una relativa omogeneità di tutti i depositi superficiali. L'omogeneità della densità relativa ed i meccanismi che l'hanno prodotta implicano: un comportamento omogeneo anche per quanto riguarda la risposta di questi depositi all'infiltrazione dell'acqua, una isotropia della porosità per cui non ci si debbono attendere grandi differenze tra permeabilità orizzontale e verticale, come invece si constata nei depositi alluvionali. Una serie di prove di infiltrazione eseguite sia in montagna che in pianura hanno infatti permesso di fissare dei valori di permeabilità satura attorno a  $2 * 10^{-5}$  m/s.

### III-9.2. Modello deterministico della stabilità con integrazione dell'idrologia

Una volta avvenuta la caratterizzazione dei pendii soggetti a scivolamenti superficiali, si è passati ad una trattazione teorico-matematica del processo.

Dal momento che l'aumento del contenuto di umidità del terreno dovuto ad una precipitazione fa diminuire la tensione capillare, appesantisce il terreno e di conseguenza fa diminuire il fattore di sicurezza, per poter identificare quali siano i valori di soglia delle precipitazioni oltre ai quali si ha pericolo, è necessario studiare come avvenga il processo idrologico connesso all'infiltrazione della pioggia.

Per far questo si è costruito un modello matematico di infiltrazione (Sincich, 1999a) che calcola la distribuzione di umidità in un terreno in funzione del tempo, nota la quantità di pioggia caduta ed alcuni parametri geotecnici quali la conducibilità e la porosità del materiale in esame.

Il modello monodimensionale realizzato descrive l'infiltrazione della pioggia nei terreni non saturi, l'avanzamento del profilo di umidificazione e l'eventuale formazione di un fronte saturo. Per far questo è stato implementato un codice di calcolo che risolve numericamente l'equazione di Fokker-Plank attraverso un procedimento di tipo iterativo.

Visto che il modello monodimensionale realizzato non è in grado di descrivere le situazioni in cui l'acqua infiltrata, una volta raggiunta la base della copertura, comincia a risalire oppure scorre lungo la copertura stessa, si è elaborato un ulteriore modello monodimensionale che studia il deflusso dell'acqua e l'eventuale formazione di uno strato saturo dovuto al suo accumulo (Sincich, 1999b).

I due modelli vengono applicati "a cascata" l'uno dopo l'altro: in questo modo il movimento dell'acqua all'interno del terreno è come se venisse descritto da un modello bidimensionale.

Come mostrato in figura III-19, prima si considera l'infiltrazione della pioggia lungo l'asse  $z$  in una colonnina generica posta lungo il pendio e poi una volta che questa ha raggiunto la base della copertura si studia lo scorrimento e l'accumulo lungo l'asse  $x^{(1)}$ .

(1) L'applicazione di un modello tridimensionale che consideri anche il movimento nella direzione  $y$  non è stato considerato dal momento che i terreni che vengono utilizzati per studiare l'innescio di frane superficiali hanno sempre pendenze abbastanza elevate. Infatti un terreno con pendenze inferiori ai 15 gradi è considerato essere sempre stabile. Per questo motivo il flusso è stato supposto nullo nella direzione  $y$ , vengono quindi trascurati gli scambi idraulici laterali, e la fascia di pendio studiata ha larghezza unitaria in tale direzione.

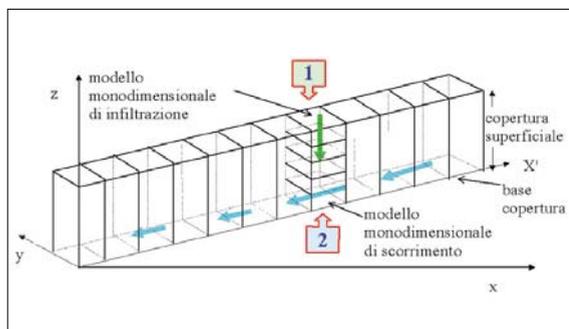


Figura III-19. Come intervengono i due modelli monodimensionali

Questo secondo codice di calcolo risolve l'equazione di Dupuit-Forcheimer opportunamente modificata per tenere conto della presenza di elevate pendenze del substrato; attraverso il suo utilizzo è possibile calcolare l'altezza del livello di falda che si viene a formare una volta che siano stati stabiliti i parametri geologici-idraulici del pendio e siano stati assegnati i dati relativi alle precipitazioni.

Con la modifica effettuata i due modelli numerici monodimensionali descrivono in modo abbastanza completo il fenomeno dell'infiltrazione, dell'accumulo e del deflusso dell'acqua in un substrato inclinato di pendenza variabile.

Una volta analizzata e modellata quella che è la parte idraulica del processo, si è passati allo studio della stabilità per valutare la possibilità o meno di innesco della frana.

Il modello che si è utilizzato è quello del pendio infinito e dell'equilibrio limite per cui il fattore di sicurezza è dato dal rapporto tra le forze stabilizzanti (coesione dovuta agli attriti interni e alla suzione) e quelle destabilizzanti (pendenza del pendio, peso del terreno in condizioni normali e di saturazione).

L'applicazione dei tre modelli appena descritti permette di stabilire il possibile innesco di una frana in funzione del valore delle seguenti variabili:

- parametri geotecnici (coesione, angolo di attrito interno, peso del terreno, porosità)
- parametri idrologici (conducibilità idraulica, umidità iniziale)
- morfologia del pendio (inclinazione del substrato, eventuale presenza di cambiamenti di pendenza, spessore della copertura, presenza di vegetazione)
- valori di precipitazioni.

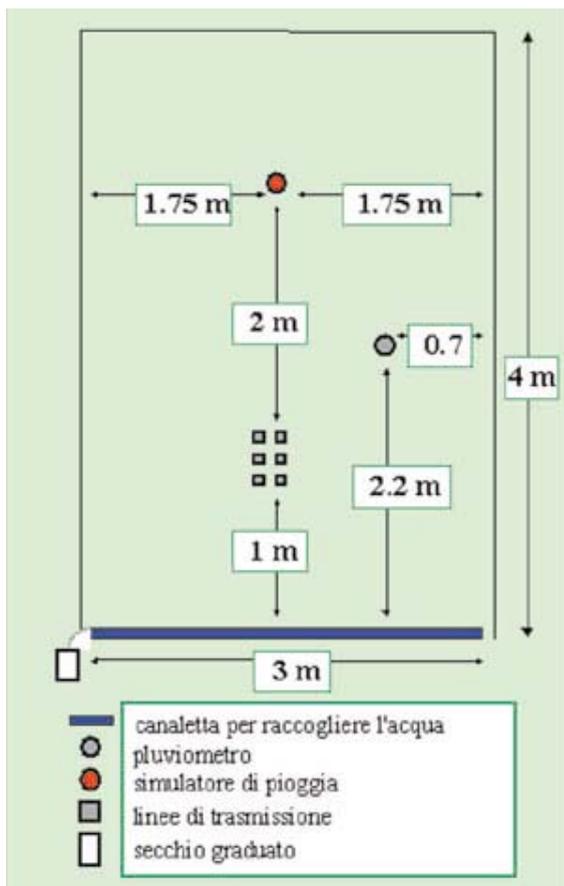
Figura III-20. Apparato sperimentale

### III-9.3. Misura dei rapporti tra quantità di pioggia ed acqua infiltrata

Spesso la determinazione dei parametri indicati nel paragrafo precedente non è facile e questo avviene in particolare per i valori da attribuire alle precipitazioni ed all'acqua infiltrata. Attraverso l'utilizzo di pluviometri è possibile eliminare il primo dubbio, mentre resta sconosciuta la percentuale di acqua che si infiltra lungo un versante.

Per risolvere questo problema si è realizzato un apposito campo sperimentale (Bulletti & Sincich, 1999) volto a misurare la quantità di acqua che ruscella lungo un pendio in rapporto all'acqua totale che cade sullo stesso (figura III-20).

Per effettuare questo esperimento si è utilizzato un simulatore di pioggia artificiale che eroga una quantità nota di acqua. Tale simulatore è stato collegato ad un misuratore di flusso che fornisce la quantità di acqua (circa 55 mm/h) buttata su di una superficie pari a 12 m<sup>2</sup>. Per poter eseguire un'ulteriore misura è stato anche posizionato un pluviometro ad una distanza media dal raggio di influenza del simulatore. A valle del pendio è stata posta una canaletta per raccogliere l'eventuale acqua ruscellata. Tale canaletta è posizionata in modo tale che l'acqua possa scorrere e venire raccolta in un opportuno secchio graduato.



Dal momento che l'acqua che non ruscella superficialmente si infiltra nel terreno, sono state poste tre coppie di linee di trasmissione di diversa lunghezza per poter misurare attraverso il TDR (Time Domain Reflectometry) le variazioni dell'umidità relativa del terreno. L'esperimento durato 3 giorni ha fornito un'idea del rapporto esistente fra la quantità di acqua piovuta sul pendio e quella infiltrata, permettendo di accertare che praticamente tutta l'acqua piovuta, circa 55 mm/h, era infiltrata.

### III-9.4. Modello probabilistico della stabilità

Un limite del modello deterministico presentato precedentemente è dato dal fatto che, a causa sia degli errori commessi durante le misure sperimentali sia dell'eterogeneità dei terreni, spesso non è possibile disporre degli esatti valori delle variabili che entrano in gioco. Per ovviare a questi inconvenienti si è modificato il codice di calcolo per valutare quale fosse il fattore di sicurezza ottenuto utilizzando dei dati di input probabilistici invece che deterministici (Sincich, 2000a).

Si è ottenuto questo assegnando ai diversi coefficienti una distribuzione di valori, utilizzata poi per calcolare

media e deviazione standard, le stesse hanno permesso di calcolare il fattore di sicurezza più probabile e la sua deviazione in funzione delle distribuzioni ottenute.

In questo modo per ogni gamma di valori assegnati ai coefficienti si ha un range entro al quale può variare il fattore di sicurezza permettendo di avere una visione più completa delle possibili risposte del terreno.

I parametri che si sono fatti variare sono:

- angolo di attrito;
- peso dell'unità di volume del terreno;
- spessore della copertura superficiale;
- inclinazione del pendio;
- rapporto tra la quantità di pioggia infiltrata e la conducibilità di saturazione ( $P/k$ ).

Alcuni dei risultati ottenuti sono riportati in figura III-21 e in figura III-22 nelle quali è rappresentata la variazione del fattore di sicurezza in funzione della durata della pioggia e la sua deviazione standard. In particolare il grafico di figura III-21 si è ottenuto mantenendo costante l'inclinazione del substrato, mentre in quello di figura III-22 si è fatta variare la pendenza di 5° in un punto posto circa a metà del pendio.

In entrambe le figure si sono considerati quattro valori diversi del rapporto fra la pioggia infiltrata e la conducibilità di saturazione.

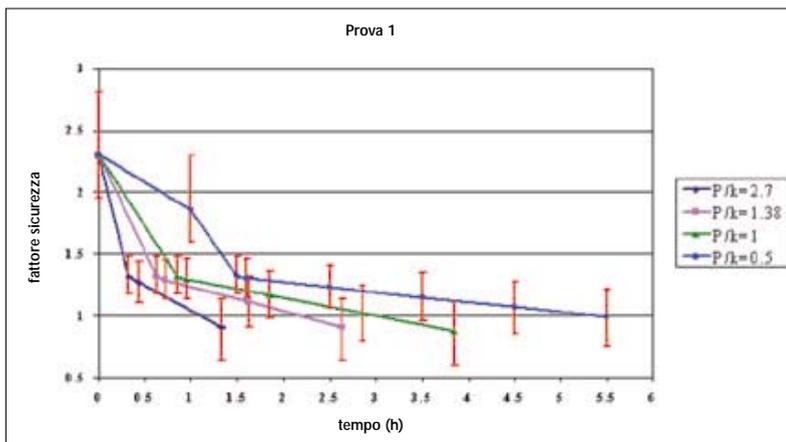


Figura III-21. Variazione del fattore di sicurezza in funzione del tempo per una pendenza costante del pendio pari a 32.5°

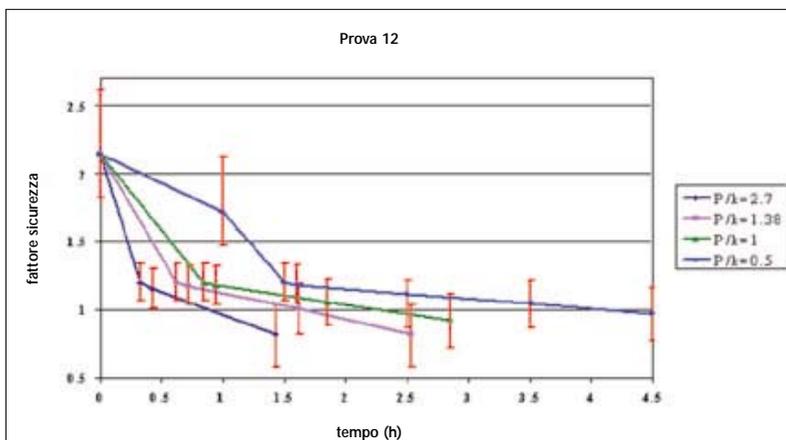


Figura III-22. Variazione del fattore di sicurezza in funzione del tempo per una pendenza variabile del pendio tra 30° e 35°

Come si evince dai grafici il cambiamento di pendenza costituisce un fattore di instabilità per il pendio a causa dell'accumulo di acqua che si può venire a creare.

### III-9.5. Intensità del pericolo in funzione dell'energia trasmessa

Fino a questo punto del lavoro ci si è concentrati esclusivamente sulla definizione di stabilità di un versante attribuendogli un fattore di sicurezza che ci dà delle informazioni sul fatto che lo stesso possa mettersi o meno in movimento.

L'ultimo problema affrontato dal nostro lavoro è stato quello di studiare la dinamica del moto, la cui conoscenza è essenziale per stabilire in quale misura l'innesco del *soil slip* sia in grado di produrre danni (Sincich, 2000b).

A tale scopo si è cercato innanzitutto di chiarire come avvenga fisicamente il processo di distacco e di sviluppo dello scivolamento per poter scegliere delle equazioni matematiche adatte per tale descrizione.

Si è scelto di trattare la massa in movimento come rigida in moto traslazionale lungo il pendio, utilizzando un approccio di questo tipo il volume della frana rimane costante durante tutto il suo percorso. Facendo questa ipotesi è stato possibile utilizzare un codice di calcolo già presente in Istituto e scritto per risolvere il moto delle valanghe. Tale codice risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes ed è in grado di fornire per ogni cella in cui è stato suddiviso il pendio, l'altezza della massa e le componenti della velocità con la quale si muove.

Infine si è utilizzata una semplice espressione che fornisce la pressione massima esercitata su un ostacolo in funzione del peso specifico, dell'altezza, della velocità e dell'angolo di incidenza fra la direzione di propagazione del moto e l'ostacolo. In questo modo è possibile conoscere l'energia con la

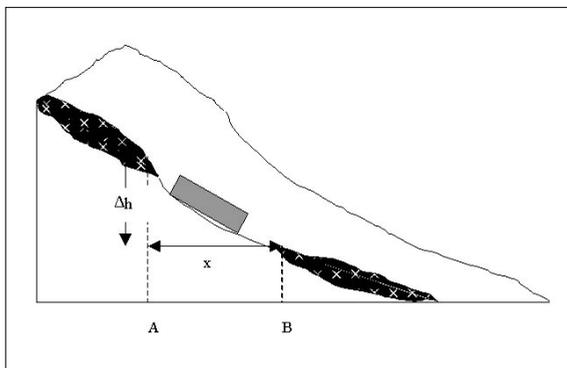


Figura III-23. Geometria di una frana superficiale

quale la massa che frana impatta su un eventuale ostacolo che incontra sul suo percorso quale ad esempio una casa.

### III-10. RISULTATI OTTENUTI: APPROCCIO SVIZZERO

Seguendo i punti secondo i quali è stato sviluppato il lavoro qui in Istituto, di seguito sono riportati i risultati ottenuti.

A. Dalle misure sperimentali svolte - con particolare riguardo in Valle di Vergeletto - si sono delineate le caratteristiche dei terreni coinvolti da scivolamenti superficiali in Ticino. Secondo la classificazione USCS risultano essere terreni di tipo GP-GM, SP-SM, SM-ML (ghiaie e sabbie mal assortite, ghiaie e sabbie con limo e sabbie limose), generalmente caratterizzati:

1. dalla presenza:
  - di uno strato superficiale di spessore compreso tra i 30 e i 40 cm con una densità relativa compresa tra il 15 e il 35% (depositi di versante);
  - di uno strato più compatto con densità relativa compresa tra 35 e 65% (*till* di alloggiamento);
  - di un substrato roccioso.
2. da una conducibilità idraulica verticale pari a  $10^{-4} \div 10^{-5}$  m/s;

B. Dai risultati ottenuti dai due modelli numerici idraulici e da quello di stabilità si è ottenuto che:

1. i parametri che influenzano il fattore di sicurezza sono:
  - l'angolo di attrito interno;
  - l'umidità iniziale;
  - l'inclinazione del pendio;
  - la morfologia del pendio;
  - la quantità di pioggia infiltrata;
  - lo spessore della copertura;

2. la conoscenza dell'umidità iniziale del terreno costituisce un dato molto importante per la corretta simulazione dell'infiltrazione dell'acqua;

3. se la pioggia infiltrata è inferiore alla conducibilità orizzontale l'acqua non si accumula sulla base della coltre di copertura e si ha l'innesco della frana solo nel caso di pendenze molto elevate per cui il solo aumento dell'umidità del terreno dovuto all'infiltrazione crea instabilità (superiori ai 40°);

4. la presenza di variazioni di pendenza favorisce l'accumulo di acqua e il conseguente

- appesantimento del terreno, per cui l'innesco delle frane si ha di preferenza in prossimità di:
- concavità del terreno;
  - passaggio da un pendio poco inclinato ad uno molto inclinato;
  - passaggio da un pendio molto inclinato ad uno poco inclinato (scivolamento al piede);
4. le piogge brevi ed intense favoriscono l'innesco degli scivolamenti superficiali per la loro capacità di far aumentare in poco tempo l'umidità del terreno.
- C. Dal campo sperimentale svolto per determinare il rapporto esistente tra la quantità di pioggia che cade e quella che scorre in superficie lungo il pendio si è trovato che la quasi totalità dell'acqua piovuta si infiltra nel terreno. Per questa ragione è ragionevole utilizzare come dato di input del modello per il valore di precipitazione, quello fornito dai pluviometri. Nel caso del nostro campo sperimentale, dai risultati delle misure effettuate con il TDR si vede che in un tempo abbastanza breve il terreno raggiunge la condizione di saturazione dopodiché l'acqua, raggiunta la base della coltre di copertura, comincia a scorrere orizzontalmente lungo di essa (anche in questo caso il valore della conducibilità orizzontale è maggiore della quantità di acqua infiltrata).
- D. Attraverso l'utilizzo del modello probabilistico ci si è resi conto di come possa variare il fattore di sicurezza in funzione della combinazione dei valori dei parametri idrologici e geologici. Le differenze che si possono ottenere arrivano ad essere anche dell'ordine del 30% rispetto al valore medio del fattore di sicurezza ottenuto con l'utilizzo del modello deterministico. È importante quindi utilizzare un approccio di questo tipo per evitare di sottovalutare la possibilità di pericolo.
- E. Infine, dal modello che studia l'evoluzione di un terreno soggetto a scivolamento superficiale, si è dedotta l'estrema pericolosità di tale fenomeno. Riportando l'esempio di una delle frane avvenuta in Valle Onsernone (figura III-24 e figura III-25) nell'agosto del 1978, il cui comportamento dinamico è stato simulato dal modello, si vede che a causa dell'elevata velocità raggiunta dalla massa in moto (anche 20 m/s), i *soil slip* trasportano un'enorme quantità di energia. In particolare la simulazione che si è svolta aveva come scopo quello di riprodurre l'abbattimento di una casa a causa della frana (figura III-26). Non essendo a conoscenza del valore esatto di tutti i parametri necessari per il funzionamento del modello, si sono eseguite diverse simulazioni in modo da

poter testare l'influenza della variazione dei coefficienti sui risultati finali. I parametri che si sono fatti variare sono:

- la viscosità cinematica;
- il coefficiente di attrito;
- il volume della massa che frana.

Quello che si è osservato è che nonostante il pendio considerato abbia un'inclinazione di circa 30° (non molto elevata), in tutte le prove effettuate la pressione di impatto della massa mobilitata contro l'edificio è sempre piuttosto alta (200-380 kPa). Utilizzando la suddivisione delle classi di intensità per le valanghe si può vedere che tali valori ricadono nell'intervallo di pericolo medio-alto delle classi di intensità (Tabella III-7).

- F. Quanto descritto nei punti precedenti, oltre a confermare una maggior propensione allo scivolamento per i terreni più acclivi, ha permesso di dare una base fisica e idrologica al diagramma di Ceriani-Agostoni, costruito per il meridione delle Alpi (Piemonte, Ticino e Valtellina) su basi statistiche. Il modello numerico ha inoltre permesso di verificare la correlazione tra la piovosità e la probabilità di eventi dannosi, il confronto tra le stazioni di Camedo e Olivone, quelle che rappresentano gli estremi per il Ticino (2200 mm/anno Camedo e 1600 mm/anno Olivone) indica che vi è una probabilità di scivolamenti superficiali del 10% a Camedo contro una dell'1% a Olivone. Le probabilità riscontrate fanno rientrare gli scivolamenti superficiali tra i fenomeni con una frequenza media (tra 30 e 100 anni) nell'ambito della scala utilizzata in Svizzera.
- G. La combinazione della frequenza con l'intensità, descritta al paragrafo E, porta a definire gli scivolamenti superficiali sui versanti come dei fenomeni ad alta pericolosità.

Figura III-24. Valle Onsernone, situazione antecedente all'alluvione del 7 agosto 1978





Figura III-25. Valle Onsernone, situazione successiva all'alluvione del 7 agosto 1978

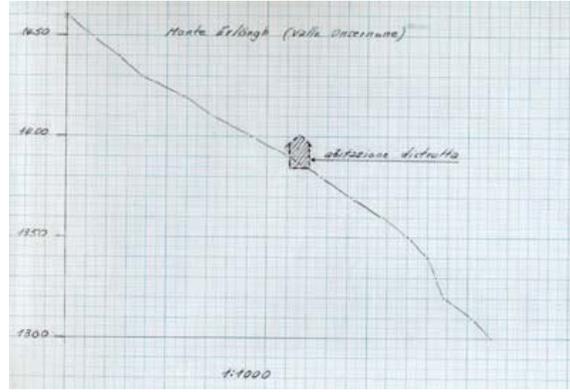


Figura III-26. Profilo del pendio in Valle Onsernone

Classi di intensità	Pressione sull'ostacolo
Alta	> 300 kPa
media	30-300 kPa
bassa	< 30 kPa

Tabella III-7. Classi di intensità in funzione della pressione esercitata sull'ostacolo

## Bibliografia

- AA.VV., (1994), Carta Geomorfológica d'Italia 1.50.000 - Guida al rilevamento. *Quaderni SGN*, Serie III, 4.
- ANSELMO V., (1979), *L'alluvione del 7 Agosto 1978 in Val d'Ossola. Aspetti idrologici del nubifragio e considerazioni sui metodi di intervento*. Lions Club of Domodossola.
- BULETTI A., (1999), *Determinazione dei parametri geotecnica della copertura quaternaria presente nella Valle di Vergeletto*. Cadenazzo: IST luglio 1999.
- BULETTI A. & SINCICH B., (1999), *Determinazione della quantità di acqua che ruscella lungo un pendio e di quella che si infiltra*. Cadenazzo: IST.
- CARTER M. & BENTLEY S.P., (1991), *Correlations of soil properties*. London: Pentech Press Limited.
- DIETRICH W.E. & MONTGOMERY D.R., (1998), *SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. <http://list-socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>.
- ESRI, (1998), *ArcView & Spatial Analyst*. Redlands CA.
- FUKUOKA M., YOSHIDA Y. & MASUDA T., (1977), *Residual strength and frictional resistance of sliding soil masses*. Journ. Fac. Eng. Univ. Tokio, 34 (1).
- KULHAWY F.H., MAYNE P.E., (1990), *Manual on estimating soil properties for foundations design*. EPRI, Palo Alto, CA.
- MOISELLO U., (1985), *Grandezze e fenomeni idrologici*. Pavia: La Goliadrica Pavese.
- MONTGOMERY D.R. & DIETRICH W.E., (1994), *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding*. Water Resources Research 30: 1153-1171.
- NACSN - North American Commission on Stratigraphic Nomenclature., (1983) - *North American Stratigraphic Code*. Am. Ass. Petroleum Geologists Bull., 67 ( ), 841-875.
- OFFICE PUBLICATIONS OFFICIELLES COMMUNAUTÈS EUROPÉENNES (1994), *CORINE Land Cover, Guide Technique*. Bruxelles.
- SINCICH B., (1999a), *Simulazione mediante modello matematico - monodimensionale dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno e applicazione nella valutazione della stabilità di un pendio con riferimento alla Val Vergeletto*. Cadenazzo: IST ottobre 1999.
- SINCICH B., (1999b), *Simulazione mediante modelli matematici-monodimensionali dell'infiltrazione e del deflusso dell'acqua in un substrato inclinato e applicazione nella valutazione della stabilità di un pendio*. Cadenazzo: IST ottobre 1999.
- SINCICH B., (2000a), *Variazione del fattore di sicurezza in funzione della pioggia infiltrata e della pendenza del pendio*. Cadenazzo: IST marzo 2000.
- SINCICH B., (2000b), *Evoluzione di un terreno soggetto a scivolamenti superficiali*. Cadenazzo: IST aprile 2000.
- SKEMPTON A.W., & DE LORY F.A., (1957), *Stability of natural slopes in London Clay*. In Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 2, 378-381.
- TROPEANO D., GOVI M., MORTARA G., TURITTO O., SORZANA P., NEGRINI G. & ARATTANO M., (1999), *Eventi alluvionali e frane nell'Italia Settentrionale (Periodo 1975-1981)*. Torino: CNR-IRPI.
- TURNER A.K., (1996), *Colluvium and Talus*. In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.), *Landslides investigation and mitigation*: 525-554. Washington D.C.: Nat. Academy Press.

## Ringraziamenti

È desiderio degli autori ringraziare gli Ingg. Luca Allavena e Maurizio Giraud per il prezioso contributo offerto.



