

SISTEMI INTEGRATI PER IL MONITORAGGIO, L'EARLY WARNING
E LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO
LUNGO LE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE



investiamo nel vostro futuro

PROGETTO PON01_01503



Quaderno / parte seconda
01 PON LEWIS
LINEE GUIDA PER
L'IDENTIFICAZIONE DI
SCENARI DI RISCHIO



autostrade // **Tech**



A cura di Francesco Muto | **DELIVERABLE WP 1.1**
Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
/ Parte seconda

INDICE

ATTIVITA' ELEMENTARE 1.1.3

1	Analisi della pericolosità e degli scenari di rischio
1	1.1.3.1 Analisi della pericolosità
6	1.1.3.1.1 Previsione tipologica
6	1.1.3.1.2 Intensità o Magnitudo
16	1.1.3.1.3 Analisi dell'evoluzione
17	1.1.3.1.4 Analisi della pericolosità spaziale
81	1.1.3.1.5 Previsione temporale (Definizione dei tempi di ritorno)
93	1.1.3.2 Valutazione del rischio
106	1.1.3.3 Metodologia applicata per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana
111	1.1.3.3.1 Pericolosità da frana
112	1.1.3.3.1.1 Delimitazione delle aree in frana
114	1.1.3.3.1.2 Definizione delle caratteristiche dei movimenti franosi
116	1.1.3.3.1.3 Valutazione della frequenza probabile dei fenomeni franosi
118	1.1.3.3.1.4 Valutazione dei livelli di pericolosità
122	1.1.3.3.2 Valutazione della suscettibilità da frana
123	1.1.3.3.2.1 Fattori predisponenti la franosità
134	1.1.3.3.2.2 Metodo di analisi statistica per la valutazione della suscettibilità
139	1.1.3.3.3 Valutazione del danno potenziale
142	1.1.3.3.4 Valutazione del rischio potenziale da frana
144	1.1.3.3.5 Scenari di evento

Riferimenti bibliografici

Analisi della pericolosità e degli scenari di rischio

La valutazione della pericolosità e del rischio rappresenta una delle problematiche di maggiore rilievo nello studio dei movimenti franosi ed è ormai, nelle realtà odierne, un'operazione necessaria e imprescindibile per una corretta gestione del territorio.

In questa sezione vengono descritti i concetti fondamentali relativi alla pericolosità da frana e del rischio ad essa associato, così come i principali metodi utilizzati per la stima della suscettibilità (pericolosità spaziale) da frana. Lo scopo è quello di definire una linea metodologica per realizzare una zonazione territoriale della pericolosità da frana e degli scenari di rischio connessi ai fenomeni franosi.

Lo scenario di rischio si può definire come lo spazio dei parametri e dei componenti del sistema territoriale (pericolosità, vulnerabilità, esposizione e caratteristiche socio-economiche) che interagiscono fra di loro e che concorrono alla determinazione degli effetti di un evento calamitoso in una determinata area. Per l'analisi e la definizione dei diversi scenari si fa riferimento alla valutazione della pericolosità da frana, dove le aree a diversa pericolosità, unitamente agli altri parametri su citati, rappresentano gli scenari considerati.

1.1.3.1 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ

Il concetto di pericolosità è da molto tempo al centro dell'attenzione di ricercatori, commissioni scientifiche ed amministratori, ciò nonostante, permangono incertezze riguardo il loro utilizzo e soprattutto sulla scelta dei parametri da utilizzare per la sua quantificazione. Secondo lo "United States Geological Survey" (USGS - Servizio Geologico degli Stati Uniti, 1977) deve essere considerato "pericolo geologico" qualsiasi processo o evento potenziale che costituisce una minaccia per la salute, la sicurezza ed il benessere di una collettività o per l'economia di una qualsiasi popolazione. Secondo questa definizione, però, un terremoto o una frana che accadono in un'area desertica non costituiscono pericolo geologico. Nel rapporto UNESCO di Varnes e IAEG

(1984) viene ribaltato il concetto e la pericolosità (*hazard*) viene definita come “probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area”.

Il cambiamento è netto: un fenomeno è pericoloso a prescindere dalla presenza dell'uomo o delle sue attività ed infrastrutture.

Questa definizione è stata largamente accettata e tutt'ora viene riportata da organismi come l'UNISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*), ma presenta dei problemi a causa delle peculiarità delle frane rispetto ad altri fenomeni naturali, come i terremoti, ai quali la definizione meglio si adatta. L'aspetto più importante è che in tale definizione manca un riferimento alle dimensioni del fenomeno e all'intensità, che ne condizionano il comportamento e le potenziali conseguenze. In questo senso Einstein (1988) propone l'utilizzo del termine “*danger*”, inteso come pericolo o intensità, per caratterizzare il fenomeno potenzialmente distruttivo e il termine “*hazard*” per dar conto della sua imprevedibilità: il pericolo comprende le caratteristiche meccaniche e geometriche del fenomeno, inclusa la sua localizzazione nello spazio, mentre la pericolosità non è altro che la probabilità di occorrenza del fenomeno.

E' evidente il tentativo di introdurre, nella valutazione della pericolosità, un parametro con il quale poter quantificare il potere distruttivo del fenomeno. Fell (1994) cerca di risolvere il problema presentando il concetto di magnitudo (intensità) e definendo la pericolosità come prodotto della probabilità di occorrenza per la magnitudo.

In Italia, per la definizione della pericolosità, solitamente si fa riferimento a Canuti & Casagli (1996), che partendo dalla terminologia riportata nel rapporto UNESCO di Varnes (1984) propongono, per la pericolosità, la seguente definizione: “probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area”; viene espressa in termini di probabilità annua o di tempo di ritorno.

Tutte le definizioni di “pericolosità da frana” riportate in letteratura (Varnes, 1984; Einstein, 1988; Fell, 1994; Canuti & Casagli, 1996; Crescenti, 1998; Panizza, 2001) incorporano tre concetti fondamentali: il concetto di localizzazione spaziale, cioè il “dove”, il concetto di intensità o magnitudo, cioè il “quanto grande” ed infine il concetto di frequenza o ricorrenza, cioè “quando” ovvero “quanto spesso” (Cardinali et al., 2002). Uno studio di pericolosità da frana per una certa area deve essere in grado, quindi, di prevedere dove una frana

avverrà, quanto sarà grande e veloce e quale sarà la sua ricorrenza temporale (tempo di ritorno).

L'ostacolo principale, nel definire in modo completo la pericolosità da frana, risiede soprattutto nel quantizzare la probabilità di occorrenza del fenomeno, ovvero la sua distribuzione temporale, che è impossibile da ottenere senza adeguati studi storici e senza le necessarie valutazioni sul ruolo dei singoli fattori d'innescio (piogge, terremoti, azione antropica, ecc.).

Molti modelli previsionali riportati in letteratura si limitano normalmente a definire dove e con quale probabilità un determinato fenomeno franoso può accadere, senza determinare esplicitamente i tempi di ritorno e l'intensità. In tal senso esistono in letteratura pochi tentativi di effettuare una determinazione completa della pericolosità (DRM 1988, 1990; Del Prete et al., 1992; Fell, 1994).

A prescindere dalla metodologia utilizzata, la valutazione e la zonazione della pericolosità deve avvalersi dei principi di base, ampiamente condivisi in letteratura (Varnes & IAEG, 1984; Carrara et al., 1991; Hutchinson & Chandler, 1991; Hutchinson, 1995; Turner & Schuster, 1995) e di seguito descritti:

- Le frane presentano caratteri morfologici evidenti, riconoscibili, classificabili e cartografabili sia in campagna sia attraverso l'interpretazione cartografica e di aerofoto (Rib & Liang, 1978; Varnes, 1978; Hansen, 1984; Hutchinson, 1988; Dikau et al., 1996).
- I meccanismi che determinano le frane rispondono a leggi fisiche determinabili empiricamente, statisticamente o in modo deterministico. I fattori di instabilità possono essere raccolti ed utilizzati per produrre modelli predittivi (Dietrich et al., 1995).
- Il passato e il presente sono la chiave per il futuro - principio dell'attualismo - (Varnes et al., 1984; Carrara et al., 1991; Hutchinson, 1995); ne consegue che la comprensione della franosità storica è necessaria per definire e prevedere la pericolosità da frana.
- L'occorrenza spazio-temporale delle frane può essere ricavata dall'analisi di dati ambientali (approccio euristico) o dedotte da modelli fisici. Pertanto, un'area può essere suddivisa in classi di pericolosità in funzione delle probabilità di occorrenza.

Alla luce di quanto esposto, la comprensione e la valutazione completa della pericolosità incorpora cinque concetti, fondamentali (Hartlén & Viberg, 1988):

- a) **previsione tipologica**: previsione del tipo di frana che può verificarsi nell'area considerata;

- b) **previsione dell'intensità:** previsione della velocità, delle dimensioni o dell'energia del fenomeno franoso;
- c) **previsione dell'evoluzione:** previsione della distanza di propagazione, dei limiti di retrogressione o di espansione laterale;
- d) **previsione spaziale:** previsione di dove, entro una data area, si può verificare una frana;
- e) **previsione temporale:** previsione di quando uno specifico fenomeno franoso può avvenire in un determinato versante.

Come è facilmente intuibile la valutazione completa della pericolosità è molto complessa: per prima cosa a causa della discontinuità "spaziale" e "temporale" degli eventi franosi. In secondo luogo per la difficoltà di riconoscere in modo esatto la causa che ha determinato l'insorgere di un fenomeno; quasi sempre infatti si assiste alla coesistenza di più aspetti intimamente interconnessi, tra fattori di predisposizione e fattori scatenanti.

La valutazione della pericolosità da frana può essere condotta a diverse scale di lavoro in funzione sia dello scopo per cui la valutazione è richiesta (pianificazione territoriale, valutazione di impatto ambientale, redazione di un piano di opzioni di intervento, definizioni di priorità, ecc.) che del grado di conoscenza del problema fisico e della disponibilità di informazioni specifiche (foto aeree, rilievi più o meno dettagliati, dati strumentali, ecc). Il calcolo delle condizioni di stabilità di un versante e, quindi, la valutazione della sua pericolosità a franare richiede l'acquisizione di dati, sia qualitativi che quantitativi, circa la geologia, l'idrologia, la geomorfologia e le proprietà meccaniche dei litotipi presenti; da questi parametri è necessario estrarre le informazioni che concorrono a definire sia lo stato attuale del pendio sia la sua evoluzione spazio-temporale e la possibile intensità con cui si verificherà il fenomeno.

La realizzazione di una carta della pericolosità da frana e del successivo rischio associato prevede una delle fasi di studio propedeutici, articolati secondo uno schema metodologico delineato dal CNR-GNDCI (Canuti & Casagli, 1996) e schematizzato in Figura 1.

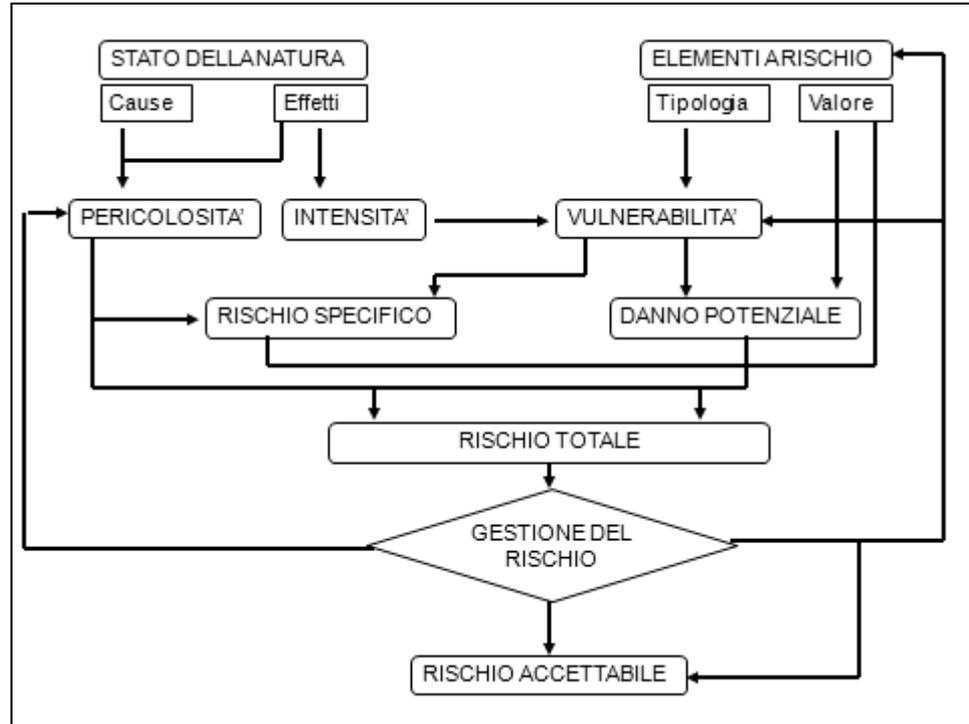


Figura 1 - Schema metodologico per l'analisi del rischio (da Canuti & Casagli, 1996).

A causa delle oggettive limitazioni, oggi si tende a produrre carte di suscettibilità o pericolosità spaziale piuttosto che carte di pericolosità; le maggiori limitazioni nella definizione completa della pericolosità includono particolarmente la natura discontinua delle frane, la difficoltà di definire le cause, i fattori d'innescio e le relazioni causa-effetto, nonché l'assenza di dati storici completi concernenti la frequenza dei processi geomorfologici.

> 1.1.3.1.1 Previsione tipologica

La previsione delle tipologie di fenomeni che si possono verificare in un certa area ed in un certo momento risulta assai importante per una corretta valutazione della pericolosità.

La tipologia del fenomeno (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1994), infatti, influenza in modo determinante la valutazione previsionale sia dell'intensità che della vulnerabilità del territorio. Inoltre, differenti tipologie presenteranno diversi fattori di controllo per l'innesco e la propagazione dei fenomeni, e perciò saranno diversi i modelli utilizzati per la previsione spaziale e temporale degli stessi.

La previsione della tipologia dei movimenti franosi viene eseguita sulla base di alcuni criteri intuitivi non formalizzati. In generale, considerando immutate le condizioni geomorfologiche e climatiche dell'area, una frana già avvenuta, con molta probabilità, tenderà a riattivarsi con la medesima tipologia. Le stesse considerazioni valgono anche per l'innesco di nuovi eventi franosi: in zone con caratteristiche simili a quelle nelle quali sono state mappate e classificate le frane esistenti, tendenzialmente avverranno fenomeni franosi dello stesso tipo. L'assetto geologico, idrologico e geomorfologico possono inoltre fornire ulteriori indicazioni sulla potenziale tipologia del fenomeno (ad es.: non ci si aspetterà una frana di crollo su pendii argillosi con pendenza moderata).

La probabilità del tipo di frana che può verificarsi in una data area non rappresenta un problema se si dispone di un'accurata carta inventario dei fenomeni franosi.

Per quanto riguarda le zone già interessate da fenomeni franosi è necessario prendere in considerazione la possibilità di un'evoluzione di tipo "complesso".

Il tipo di frana di aree potenzialmente instabili può essere previsto considerando le tipologie di dissesto presenti in zone con caratteristiche geologiche, geomorfologiche, di copertura e uso del suolo simili.

> 1.1.3.1.2 Intensità o Magnitudo

La pericolosità si può generalmente definire come la probabilità che un dato fenomeno di una certa intensità occorra in un dato tempo e in una determinata area. Poiché legata alla probabilità annuale o al tempo di ritorno di una frana, la pericolosità va riferita ad una determinata intensità o magnitudo del fenomeno franoso. L'intensità è la severità geometrica del fenomeno potenzialmente

distruttivo. E' espressa in una scala relativa o in termini di una o più grandezze caratteristiche del fenomeno stesso come velocità, volume o energia. Come è ovvio, questi parametri non sono costanti nello spazio e nel tempo, ma variano all'interno del percorso e dell'area di propagazione del fenomeno.

Hungr (1995) propone una distinzione concettuale tra intensità e magnitudo. La magnitudo è un parametro che descrive la scala di un evento ed è riferito al volume del materiale coinvolto nell'evento, distinguendo il volume iniziale dal volume dei depositi che può aumentare per rigonfiamento o erosione di altro materiale lungo il percorso, oppure ridursi per parziale deposizione o ramificazione del materiale durante il deflusso.

L'intensità (magnitudo) di un fenomeno va riferita a quei caratteri che descrivono qualitativamente o quantitativamente l'impatto dell'evento. Il potere distruttivo di una frana, in prima analisi, è funzione sia della sua velocità sia del suo volume (dimensione), anche se nei piani di gestione della pericolosità e del rischio si considera principalmente la velocità, perché intimamente correlata alla salvaguardia dell'incolumità delle persone.

Altri parametri possono essere la durata del movimento, l'altezza del flusso al fronte, la massima altezza di deflusso, lo spessore dei depositi e la profondità dell'erosione. Tutti questi parametri definiscono, inoltre, l'estensione della zona di impatto.

Ciononostante, la definizione dell'intensità dei fenomeni franosi è spesso più problematica, dipendendo dai suddetti fattori spesso di difficile valutazione, rispetto ad altre tipologie di eventi (precipitazioni estreme, alluvioni, terremoto, ecc.).

Velocità, dimensioni e energia dei movimenti franosi

Velocità

Per quanto concerne la velocità, si fa riferimento alla scala di intensità dei fenomeni franosi proposta da Hungr (1981) in parte modificata da Cruden & Varnes (1994) basata sulla velocità del movimento associata ad una scala dei danni prodotti dalla frana. Cruden & Varnes (1994) individuano uno spettro di velocità basato su 7 diversi intervalli (Tab.1).

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità	(m/s)
7	Estremamente rapido	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	5 m/s	5
6	Molto rapido	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3m/min	5×10^{-2}
5	Rapido	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili e installazioni permanenti.	1.8 m/h	5×10^{-4}
4	Moderato	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	13m/mese	5×10^{-6}
3	Lento	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	1.6 m/anno	5×10^{-8}
2	Molto lento	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16 mm/anno	5×10^{-10}
1	Estremamente lento	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni		

Tabella 1 - Scala delle velocità e dei danni prodotti dalle frane (Cruden & Varnes, 1994).

La valutazione della velocità di un fenomeno franoso è in genere problematica. Una stima approssimata della velocità può essere ottenuta dalla tipologia del fenomeno e dal suo stato di attività (Varnes, 1978) come riportato nella Tabella 12.

	CLASSI DI VELOCITÀ'						
	1	2	3	4	5	6	7
Crollo							
Ribaltamento							
Scivolamento di roccia (neoformazione)							
Scivolamento di roccia (riattivazione)							
Scivolamento di detrito							
Scivolamento di terra (neoformazione)							
Scivolamento di terra (riattivazione)							
Espansione laterale in roccia							
Espansione laterale di blocchi di roccia sopra livello duttile							
Espansione laterale per liquefazione							
Colamento in roccia							
Colamento di detrito							
Colamento di terra coesiva (neoformazione)							
Colamento di terra coesiva (riattivazione)							

Tabella 2 - Velocità delle frane (riferita alle classi proposte da Cruden & Varnes, 1994) in base alla tipologia del movimento, al materiale coinvolto e allo stato di attività. N= neoformazione; R = riattivazione.

Altro approccio per una stima approssimativa delle velocità di movimento per diverse tipologie di fenomeni franosi è quello proposto da Canuti & Casagli (1996), riportato in Tabella 3, che si basa sulla tipologia del movimento franoso, sul materiale coinvolto ed sullo stato di attività (neoformazione o riattivazione).

Tipologia	Crollo	Scivolamento					Colamento		
Materiale	Roccia	Roccia		Detrito	Terra		Roccia	Detrito	Terra
Stato di attività	-	N	R	-	N	R	-	-	-
Classe di velocità	6-7	5-6	1-5	1-6	5-6	1-5	1-2	1-7	1-4

Tabella 3 - Velocità delle frane (riferita alle classi proposte da Cruden & Varnes, 1994, vedi tabella 2.1) in base alla tipologia del movimento, al materiale coinvolte allo stato di attività. N = neoformazione; R = riattivazione.

La relazione fra tipo di movimento e velocità è abbastanza evidente: una colata di detrito a rapida evoluzione o un crollo di roccia sono molto rapidi o estremamente rapidi, mentre una colata di terra è di solito lenta o molto lenta. Esistono, comunque, alcune eccezioni discusse da Hutchinson (1987); l'autore ritiene che, rispetto allo stato di attività, un movimento di neoformazione in genere sia più veloce della riattivazione di uno pre-esistente a causa del comportamento "fragile" nel primo caso e "duttile" nel secondo in cui la resistenza al taglio è prossima o pari ai valori residui. Tale differenza è proporzionale alla fragilità del materiale.

La zonazione del territorio in classi d'intensità avviene attraverso l'interpretazione dei dati raccolti nella carta inventario dei fenomeni franosi, integrata con altre informazioni. I fenomeni franosi cartografati devono essere classificati in base all'estensione areale e alla velocità presunta; per la stima di quest'ultima può essere utilizzato lo schema proposto nelle Tabelle 14 e 15 Per quanto riguarda i versanti potenzialmente instabili, è necessario tener conto delle tipologie di frana che si verificano in condizioni geologiche, morfologiche, vegetazionali e antropiche simili.

			Velocità				
			Classe	v0	v1	v2	v3
			Valori di rif.	-	< 10 ⁻⁶ m/s (< m/mese)	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴ m/s (m/mese - m/h)	> 10 ⁻⁴ m/s (>m/h)
	Classe	Valori di rif.	Descrizione	Trascurabile	Lento	Moderato	Rapido
A R E A	a0	-	Trascurabile	I0	I0	I0	I0
	a1	< 10 ³ m ²	Modesta	I0	I1	I2	I3
	a2	10 ³ - 10 ⁵ m ²	Media	I0	I1	I2	I3
	a3	> 10 ⁵ m ²	Grande	I0	I2	I3	I3

Tabella 4 - Schema per la valutazione semplificata dell'intensità.

Intensità		Descrizione
I0	Nulla	non si ritengono possibili frane di entità apprezzabile
I1	Lieve	sono presenti, o si possono presumibilmente verificare, solo frane di modesta entità
I2	Media	sono presenti, o si possono presumibilmente verificare, solo frane di entità intermedia
I3	Elevata	sono presenti, o si possono presumibilmente verificare, frane di maggiore entità

Tabella 5 - Classi di intensità riferite allo schema precedente.

Dimensioni

Altro parametro per definire l'intensità di una frana è la stima delle dimensioni della massa spostata in un evento franoso. Per definire le dimensioni di un movimento franoso si adotta la terminologia raccomandata dal WP/WLI nel 1993, riportata in Figura 2:

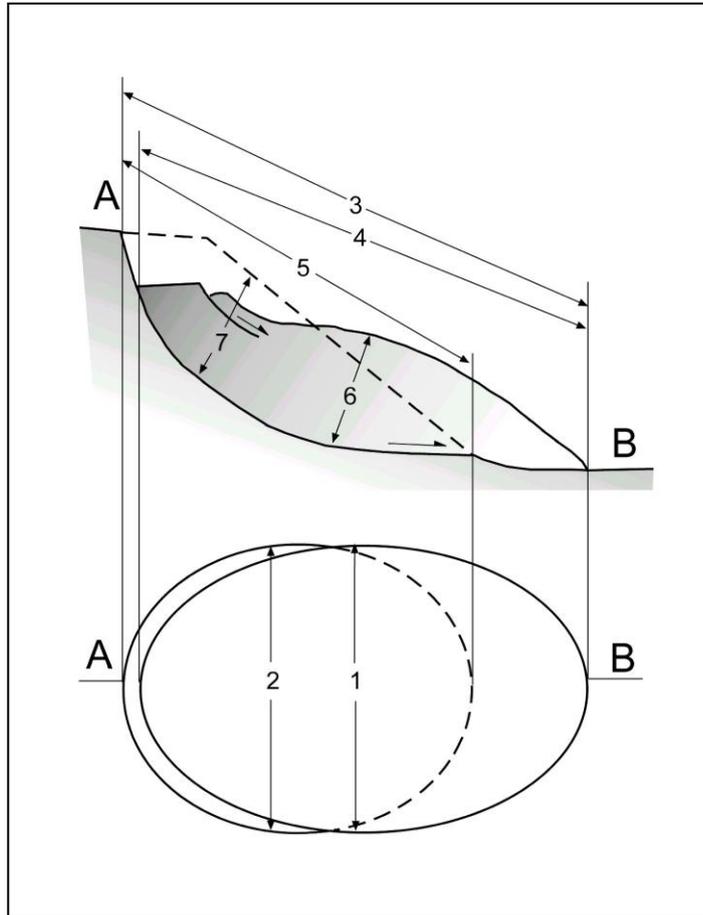


Figura 2 - Dimensioni dei movimenti franosi (da WP/WLI, 1993).

- 1) Larghezza della massa spostata W_d : larghezza massima della “massa spostata” misurata perpendicolarmente alla “lunghezza della massa spostata” L_d .
- 2) Larghezza della superficie di rottura W_r : larghezza massima fra i “fianchi” della frana, misurata perpendicolarmente alla “lunghezza della superficie di rottura” L_r .
- 3) Lunghezza totale L : distanza minima fra il “punto inferiore” della frana ed il “coronamento”.
- 4) Lunghezza della massa spostata L_d : minima distanza fra il “punto sommitale” ed il “punto inferiore”.

- 5) Lunghezza della superficie di rottura L_r : minima distanza fra l'“unghia della superficie di rottura” ed il “coronamento”.
- 6) Profondità della massa spostata D_d : profondità massima della “superficie di rottura” sotto la “superficie originaria del versante” misurata perpendicolarmente al piano contenente L_d e W_d .
- 7) Profondità della superficie di rottura D : profondità massima della “superficie di rottura” sotto la “superficie del versante” misurata perpendicolarmente al piano contenente L_r e W_r .

L'approccio, proposto da Fell (1994) riportato in Tabella 6 esprime l'intensità della frana come il volume in m^3 della massa spostata.

Intensità (I)	Descrizione	Volume (m^3)
7	Estremamente grande	$> 5 \times 10^6$
6	Molto grande	1×10^6 , 5×10^6
5	Mediamente grande	2.5×10^5 , 1×10^6
4	Media	5×10^4 , 2.5×10^5
3	Piccola	5×10^3 , 5×10^4
2.5	Molto piccola	5×10^2 , 5×10^3
2	Estremamente piccola	$< 5 \times 10^2$

Tabella 6 - Scala dell'intensità delle frane basata sul volume della massa spostata (Fell, 1994).

La stima del volume coinvolto nel movimento franoso è di difficile determinazione e quindi, solitamente, si basa su considerazioni morfologiche relative alla zona di distacco ed al accumulo di frana, distinguendo le frane profonde, che generalmente coinvolgono volumi considerevoli, dalle frane superficiali, che solitamente interessano volumi ridotti. Il DRM (1990) ha proposto di associare i volumi di materiale mobilizzato distinti per diverse tipologie di frana ai livelli di intensità calcolati rispetto alle conseguenze sull'uomo e sulle perdite economiche. Per le frane di scivolamento, in cui la stima del volume spostato è particolarmente difficile, la Tabella 7 fa riferimento ai limiti di profondità.

CROLLI E RIBALTAMENTI			
		Volume (m³)	Descrizione
H ₁	E ₁	< 10 ²	Caduta di blocchi isolati
H ₂	E ₂	10 ² - 10 ⁴	Crollo, ribaltamento o scivolamento di blocchi
H ₃	E ₃	10 ⁴ - 10 ⁶	Crollo in massa
H ₃	E ₄	> 10 ⁶	Crollo o scivolamento di roccia catastrofico
COLATE			
		Volume (m³)	Descrizione
H ₁	E ₁	< 5 x 10 ²	Colata o scivolamento di fango
H ₂	E ₂	5 x 10 ² - 10 ⁴	Colata di fango o detrito
H ₃	E ₃	10 ⁴ - 10 ⁶	Colata rapida di detrito
H ₃	E ₄	> 10 ⁶	Trasporto in massa eccezionale
SCIVOLAMENTI			
		Profondità(m)	Descrizione
H ₀	E ₁	< 2	Scivolamento superficiale o soliflusso
H ₀	E ₂	2 – 10	Scivolamento localizzato
H ₀	E ₃	10 – 50	Scivolamento di un versante
H ₀	E ₄	> 50	Scivolamento eccezionale

Tabella 7 - Corrispondenza tra intensità e caratteristiche fisiche della frana (DRM, 1990).

L'associazione delle due scale di intensità fa riferimento a valutazioni sulla velocità di movimento: infatti le due scale coincidono per i movimenti rapidi quali i crolli e i colamenti; per quanto riguarda invece gli scivolamenti, generalmente lenti, l'intensità rispetto alle conseguenze sul piano umano è da considerarsi nulla (H₀) indipendentemente dalle dimensioni del fenomeno, includendo, quindi, delle valutazioni sulla vulnerabilità. Le sigle H ed E corrispondenti ai termini in lingua francese *humaine* e *économique*, non vanno confusi con la terminologia UNESCO in cui H è la pericolosità ed E gli elementi a rischio.

Energia

Gli approcci tramite velocità e dimensioni sono entrambi parziali poiché non completamente indicativi dell'intensità. Ad esempio la sola dimensione di una frana difficilmente può essere in grado di definire l'intensità del fenomeno poiché frane di piccole dimensioni ma con elevate velocità (es. crolli, colate rapide di terra o di detrito) sono potenzialmente più pericolosi rispetto a fenomeni di dimensioni maggiori e con cinematismi lenti. Morgenstern (1985) e da Cruden & Varnes (1996) evidenziano come frane di ridotte dimensioni ed elevata velocità producono spesso più danni di grandi frane con bassa velocità, in quanto proporzionali all'energia cinetica del fenomeno.

L'intensità potrebbe essere considerata proporzionale all'energia cinetica di una frana; essa è variabile nel tempo ed è nulla prima dell'evento, crescente dopo l'insorgere del fenomeno fino ad un valore massimo, poi decrescente fino ad annullarsi di nuovo. Per l'intensità della frana si può considerare la massima energia cinetica istantanea oppure l'energia cinetica media. Una stima del bilancio energetico di una frana è stato proposto da Heim (1932) e ripreso, fra gli altri, da Scheidegger (1973), Hsü (1975) e Sassa (1988), e si basa sull'ipotesi che tutta l'energia persa nel movimento sia dissipata per attrito. Con riferimento alla Figura 3, il bilancio energetico di una frana di massa m , il cui centro di massa si trovi ad un'altezza y dal punto di arresto ed a una distanza orizzontale x dal punto di distacco, sottoposta ad un'accelerazione gravitazionale g , può essere espresso dalla seguente relazione:

$$y = y_0 - \frac{v^2}{2g} - x \tan \Phi_a$$

La distanza di arrivo della frana e la velocità possono essere semplicemente stimate tracciando una *linea di energia* passante per il centro di massa all'inizio del movimento ed inclinata di un angolo f_a sull'orizzontale. L'energia cinetica massima sviluppata dalla frana è pertanto proporzionale alla massima distanza fra il profilo topografico e la linea di energia; l'energia cinetica media è proporzionale invece all'area del settore compreso fra il profilo e la linea di energia (Fig. 3).

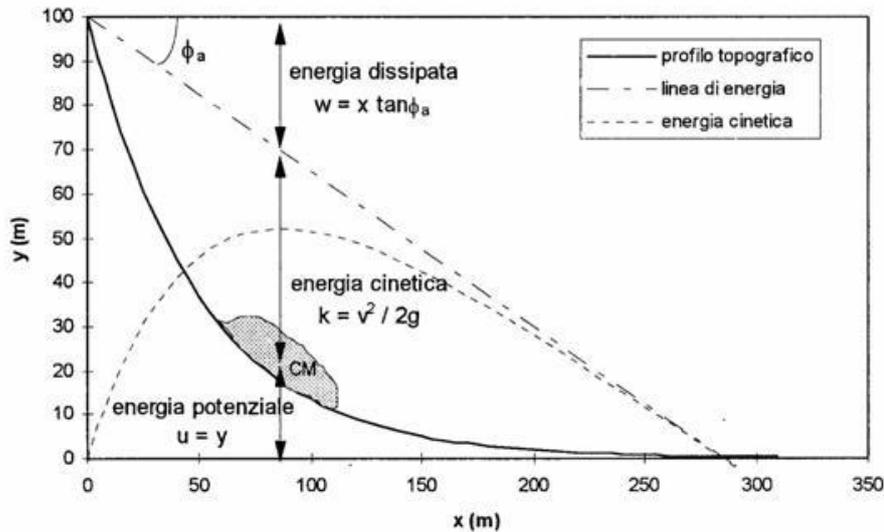


Figura 3 - Modello a slitta per l'interpretazione dei fenomeni franosi (Sassa, 1988).

CM = centro di massa della massa spostata;

u = energia potenziale;

k = energia cinetica;

w = lavoro delle forze di attrito; Φ_a = angolo di attrito apparente. Retinato: massa spostata.

> 1.1.3.1.3 Analisi dell'evoluzione

La previsione della propagazione dei fenomeni è un altro aspetto importante nel processo di valutazione della pericolosità, in quanto consente di individuare le aree che possono essere interessate, direttamente o indirettamente, dal fenomeno franoso. È da valutare con attenzione, soprattutto per quei tipi di fenomeni caratterizzati da elevata velocità e notevole distanza di espansione (ad esempio *debris flows* e frane di crollo).

La previsione dell'evoluzione si articola in tre fasi:

- previsione della distanza di propagazione;
- previsione dei limiti di retrogressione;
- previsione dell'espansione laterale.

Le metodologie utili allo studio della propagazione delle frane sono molteplici e differenti in relazione alla tipologia del fenomeno in esame.

L'evoluzione spaziale del fenomeno è legata alla natura fisico-meccanica dello stesso ed è pertanto regolata da leggi complesse che devono tenere in considerazione i parametri fisici (massa, densità, ecc.), meccanici (coesione, resistenza al taglio, ecc.) e geometrici (forma dei blocchi, forma dei ciottoli) dei materiali. Inoltre, diversi fattori esterni, quali la topografia, la rugosità della superficie, la vegetazione, la presenza di strutture antropiche, ecc., influiscono sulla propagazione del fenomeno,

In letteratura vengono presentati modelli fisici per calcolare le distanze di propagazione di diversi tipi di frana (Miao et al., 2001); altri approcci sono di tipo empirico, correlando, ad esempio, le dimensioni della frana alle condizioni topografiche (Corominas, 1996; Rickenmann, 1999; McClung, 2001).

Per quanto riguarda la previsione dei limiti di retrogressione, essa si effettua essenzialmente durante il rilievo sul terreno. E' importante descrivere il tipo di frana e lo stile di attività, riportando in carta la presenza di segnali precursori, come fessure e scarpate nella zona di coronamento. In alcuni casi, il limite massimo di retrogressione può essere posto lungo la linea dello spartiacque, anche se spesso risulta troppo cautelativo.

> 1.1.3.1.4 Analisi della pericolosità spaziale

La pericolosità da frana di un'area, come in precedenza descritto, rappresenta la probabilità che un evento franoso, di una data intensità, avvenga al suo interno, in un determinato intervallo di tempo (Varnes & IAEG, 1984). Considerato che il fattore probabilistico temporale è spesso di difficile determinazione, nella pratica si ricorre spesso al concetto di pericolosità spaziale o suscettibilità da frana (Brabb, 1984; Guzzetti, 1999), la quale descrive, in termini qualitativi o quantitativi, la distribuzione spaziale delle frane che insistono e/o possono verificarsi in un'area (Fell et al., 2008). Una carta della suscettibilità da frana, quindi, descrive la distribuzione della probabilità spaziale (geografica), associata al verificarsi di una frana, senza considerare la probabilità temporale del fenomeno (Dai et al., 2002). Nel determinare la suscettibilità da frana quindi si indica l'attitudine di un'area all'innescò di frane in relazione alle sue caratteristiche fisiche (geologiche, morfologiche, climatiche, ecc.).

Molti studi sono stati realizzati per stimare la suscettibilità da frana utilizzando metodi differenti che permettono di associare alle porzioni di territorio analizzati (versanti o porzioni di versante o aree omogenee, a seconda del metodo

utilizzato) un valore o grado di suscettibilità (Carrara et al., 1983, 1995; Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993, 1997; Soeters & Van Westen, 1996; Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti et al., 1999, Rautela et al., 2000; Lee et al., 2001, 2002, 2004, 2007; Clerici et al., 2002; Zézere, 2002; Cevik E., Topal T., 2003; Fernandez et al., 2003; Suzen et al., 2004; Catani et al., 2005; Saha et al., 2005; Bartolomei et al., 2006; Conoscenti et al., 2008; Falaschi et al., 2007; Greco et al., 2007; Caniani et al., 2008; Magliulo et al., 2008; Yalcin, 2007, 2008; Conforti et al., 2012).

Gran parte di queste metodologie si basa sull'individuazione e sulla caratterizzazione spaziale di un data set di fattori predisponenti e sulla quantificazione delle relazioni spaziali intercorrenti tra questi ed un data set di frane pregresse (carta inventario), sfruttando l'assunto che le frane future si verificheranno, con molta probabilità, sotto le stesse condizioni di quelle che hanno generato le frane pregresse (Guzzetti et al., 1999). Questo approccio trova una sua naturale applicazione nei metodi indiretti basati sull'utilizzo dei sistemi GIS (Fabbri & Chung, 2003), sia per la definizione di modelli parametrici di tipo euristico, sia per la messa a punto di veri e propri modelli stocastici (Carrara et al., 1995; Chung & Fabbri, 1995; Conoscenti et al., 2008; Van Den Eeckhaut et al., 2009).

Fattori predisponenti la franosità

Le cause o i fattori che concorrono alla franosità di un territorio possono essere suddivisi in due gruppi:

1. Cause preparatorie o predisponenti. Rientrano in questa categoria i fattori intrinseci di stabilità che sono legati essenzialmente alle caratteristiche litologiche, strutturali, tessiturali e giaciture dei materiali costituenti il pendio;
2. Cause scatenanti o innescanti. Sono essenzialmente singoli eventi che innescano il movimento franoso agendo su un pendio già intrinsecamente instabile. I fattori scatenanti possono essere ad esempio: intense precipitazioni, cambiamenti delle condizioni idrologiche, attività sismica, attività antropiche come ad esempio disboscamenti, variazioni dei carichi statici o dinamici, la variazioni della geometria dei pendii, erosione, cambiamenti climatici, etc.

Sebbene i movimenti franosi siano spesso innescati da un singolo evento, come una pioggia intensa o un sisma, è anche vero che essi sono strettamente

legati alla concomitanza di alcuni fattori geo-ambientali, come acclività, litologia, uso del suolo, ecc., che rendono un versante più o meno propenso a franare.

I fattori che concorrono alla franosità del territorio sono complessi ed eterogenei e, spesso, interrelati fra loro; dall'esame della letteratura sull'argomento (Terzaghi, 1950; Carrara & Merenda, 1974; Cotecchia, 1978; Varnes, 1978; Hansen, 1984; Esu, 1984; Crozier, 1986; Canuti et al., 1992; Amanti et al., 1992; Cruden & Varnes, 1994; Hutchinson, 1995), in Tabella 8 si riporta un elenco dei principali fattori predisponenti la franosità di un'area.

LITOSTRATIGRAFIA

1. Caratteristiche composizionali (es. materiali intrinsecamente deboli, contenuto di particelle argillose, etc.);
2. Caratteristiche stratigrafiche (es. contrasto in competenza: materiale rigido su materiale duttile);
3. Caratteristiche tessiturali (es. porosità, materiali con tessitura metastabile, etc.);
4. Strutture primarie (stratificazione, fissilità, scistosità, ecc.);
5. Caratteristiche mineralogiche, petrografiche e geochimiche (es. tipologia dei minerali argillosi, alterazione, etc.).

TETTONICA

1. Strutture secondarie (giunti, faglie, pieghe, bande di taglio, flessure, ecc.);
2. Storia tettonica dell'area;
3. Sollevamento e/o basculamento neotettonico.

GEOLOGIA DEL QUATERNARIO

1. Degradazione meteorica (disgregazione fisica o decomposizione chimica);
2. Spessore delle coperture detritiche, regolitiche e delle coltri di degradazione;
3. Variazioni climatiche;
4. Variazioni eustatiche;
5. Scioglimento dei ghiacciai (es. scarico delle glaciopressioni);
6. Deglaciazione del permafrost (geliflusso); glacioeustasia e

glacioisostasia;

7. Paleofrane o frane relitte.

GEOTECNICA E GEOMECCANCA

1. Granulometria;
2. Proprietà indice (limiti di Atterberg, point load, etc.);
3. Cementazione (es. contenuto in carbonato di calcio);
4. Peso di volume (al contenuto d'acqua naturale, allo stato secco, allo stato saturo);
5. Resistenza al taglio del materiale (di picco, allo stato critico, residua; drenata o non drenata);
6. Resistenza a trazione;
7. Caratteristiche geometriche delle discontinuità (es. orientazione, spaziatura, persistenza, rugosità, etc.);
8. Caratteristiche meccaniche delle discontinuità (es. resistenza al taglio);
9. Presenza di superfici di taglio pre-esistenti;
10. Presenza di materiali organici;
11. Sensibilità (variazione di resistenza con il rimaneggiamento);
12. Fragilità e rottura progressiva;
13. Fessurazione e rammollimento;
14. Rigonfiamento e consolidazione;
15. Storia tensionale (es. pressione e rapporto di sovraconsolidazione);
16. Stato tensionale in situ.

SISMICITÀ

1. Neotettonica, modello geodinamico regionale;
2. Sismicità storica e strumentale, modello sismotettonico;
3. Caratteristiche della sorgente (legge di ricorrenza, massima magnitudo attendibile, profondità dell'ipocentro, geometria della sorgente etc.); legge di attenuazione;

4. Macrozonazione sismica: scuotibilit  (intensit , accelerazione di picco, spettro di risposta, etc.)
5. Microzonazione sismica: risposta sismica locale (es. amplificazione), effetti dinamici sulle propriet  del terreno (liquefazione; effetti dinamici sulle pressioni neutre e sulla resistenza al taglio).

ATTIVIT  VULCANICA

1. Emissione di vapore e sua successiva condensazione; di tephra;
2. Alterazione idrotermale;
3. Scioglimento di ghiacci e neve;
4. Sollevamento vulcanico;
5. Deviazioni del reticolo idrografico.

GEOMORFOLOGIA

1. Morfometria dei versanti (pendenza, altezza, lunghezza, forma, esposizione, etc.);
2. Morfometria dei bacini idrografici e degli alvei;
3. Energia del rilievo;
4. Erosione (fluviale, marina, glaciale, etc.) al piede del versante;
5. Erosione superficiale (ruscellamento diffuso o concentrato);
6. Erosione sotterranea (soluzione, carsismo, sifonamento, ...);
7. Deposito che causa un carico sul pendio o sulla sua cresta;
8. Rimozione della vegetazione (per cause naturali).

CLIMATOLOGIA, METEOROLOGIA E IDROLOGIA

1. Regime pluviometrico;
2. Frequenza, intensit  e durata degli eventi meteorologici estremi (es. precipitazioni intense, precipitazioni eccezionali prolungate);
3. Regime termometrico (fusione della neve o del ghiaccio, congelamento dell'acqua delle sorgenti);
4. Variazioni di livello idrografico (laghi o fiumi);
5. Variazioni di livello mareografico;
6. Escursione termica (termoclastismo e gelifrazione);
7. Variazioni di umidit  nel suolo (imbibizione/disseccamento);

8. Presenza di movimenti di massa preesistenti e frequenza delle riattivazioni.
<p>VEGETAZIONE E USO DEL SUOLO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Caratteristiche pedologiche (es. tipo di suolo, tessitura, struttura, profondità, sostanza organica, contenuto in carbonati); 2. Uso agro-silvo-pastorale del suolo (es. seminativo, seminativo arborato, colture specializzate, prato o pascolo, cespugliato, incolto, bosco, etc.) 3. Tipo e stato della copertura vegetale (es. copertura fogliare, profondità e resistenza degli apparati radicali, peso della vegetazione, etc.); 4. Tecniche colturali (es. rittochino, a terrazzi, a strisce, a giropoggio, etc.).
<p>FATTORI ANTROPICI</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Scavo sul pendio o alla sua unghia; 2. Carico del pendio o della sua cresta; 3. Variazioni di livello in un vaso (es. raggiungimento del livello di vaso critico; vaso rapido); 4. Disboscamento e rimboschimento; 5. Irrigazione; 6. Fattività mineraria; 7. Vibrazioni artificiali; 8. Perdite d'acqua (serbatoi, acquedotti, reti fognarie).

Tabella 8 - Fattori predisponenti la franosità.

La distribuzione spaziale dei fattori predisponenti la franosità e la loro parametrizzazione sono alla base della valutazione e distribuzione spaziale della suscettibilità da frana. In generale si può affermare che un'area è suscettibile al dissesto quando le sue caratteristiche intrinseche sono confrontabili con una seconda area nella quale si sia già verificato un fenomeno franoso.

La suscettibilità da frana quindi deriva dalla somma e dalle relazioni che intercorrono tra i vari fattori predisponenti che controllano la stabilità dei versanti. La conoscenza delle loro interazioni può fornire importanti informazioni sulla possibile ubicazione di frane future, consentendo così una pianificazione razionale ed uno sviluppo del territorio.

La scelta dei fattori predisponenti è considerata uno dei passi più importanti nello studio della suscettibilità da frana (Guzzetti et al., 2000; Ercanoglu &

Gokceoglu, 2004), in quanto l'affidabilità e la precisione dei dati raccolti influisce sul successo del metodo applicato. Inoltre, quando si applica un metodo di valutazione della suscettibilità è molto importante definire quali fattori controllano i gradi di suscettibilità, infatti un fattore predisponente può influire maggiormente sull'innescò di movimenti gravitativi in un'area ed essere poco significativo in un'altra area (Ercanoglu & Gokceoglu, 2004). Questo spiega perché, per la costruzione della carta della suscettibilità da frana, possono essere utilizzati differenti fattori in base alle diverse caratteristiche geo-ambientali all'area di studio.

La scelta dei fattori predisponenti è, inoltre, subordinata al soddisfacimento del requisito essenziale di coprire l'intera area di studio, in quanto dati discontinui comprometterebbero l'analisi portando a distorsioni o a interpretazioni errate delle correlazioni tra ciascun fattore ed i movimenti gravitativi.

In Italia, ogni Amministrazione locale possiede diverse banche dati territoriali, a scale diverse e per scopi diversi. Tra queste solo tre banche dati, che fanno riferimento a progetti nazionali codificati, sono state realizzate seguendo criteri omogenei: il modello digitale del terreno (DTM), la carta geologica e la carta dell'uso del suolo. Nonostante il loro numero limitato, queste banche dati sono sufficienti per tenere conto di:

- 1) proprietà fisiche dei terreni (litologia, derivata dalla carta geologica);
- 2) caratteristiche morfologiche (pendenza, derivata da DTM) in relazione alle proprietà meccaniche dei terreni (cioè angolo di riposo) e ai processi tettonici (ossia energia del rilievo);
- 3) condizioni climatiche (esposizione dei versanti, intesa come umidità dei terreni, ossia variazione del contenuto d'acqua a causa dell'esposizione al sole);
- 4) attività antropiche (uso del suolo), che in ultima analisi, rappresentano i fattori fondamentali che influenzano il paesaggio.

Metodi per la valutazione della pericolosità spaziale

In letteratura sono stati utilizzati diversi metodi per eseguire l'analisi di suscettibilità da frana; essi possono essere suddivisi in quattro tipologie: metodi di analisi geomorfologica, mediante i quali si ottengono carte inventario dei fenomeni franosi, metodi euristici, metodi deterministici e metodi statistici che possono essere di tipo bivariato e/o multivariato (Soeters & Van Westen, 1996; Van Westen et al., 1997; Aleotti & Chowdhury, 1999). I primi due approcci sono

definiti qualitativi, mentre gli altri due sono detti metodi quantitativi (Fig. 4). Questi ultimi garantiscono un minor grado di soggettività, rispetto ai metodi euristici, e risultano idonei per analisi di suscettibilità su aree vaste; inoltre, permettono di identificare e di descrivere con maggiore precisione le relazioni esistenti tra fenomeni franosi e fattori predisponenti (Bartolomei et al., 2006).

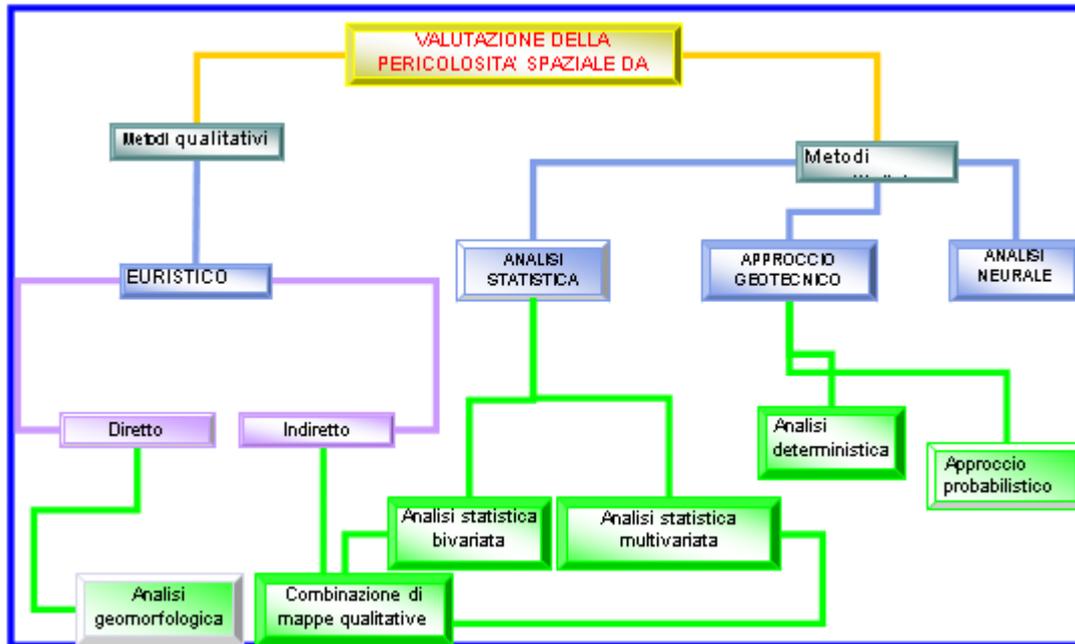


Figura 4 - Metodologie per la valutazione della pericolosità spaziale da frana (da Aleotti & Chowdhury, 1999, modificato).

Carta inventario dei movimenti franosi

La carta inventario delle frane riveste un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella verifica del metodo utilizzato per la valutazione della pericolosità spaziale, a prescindere del modello scelto. Pur non utilizzando i dati relativi alla localizzazione delle frane nella fase di messa a punto del modello, ad esempio in un modello numerico, tale informazione sarà necessaria per la verifica e validazione dei risultati.

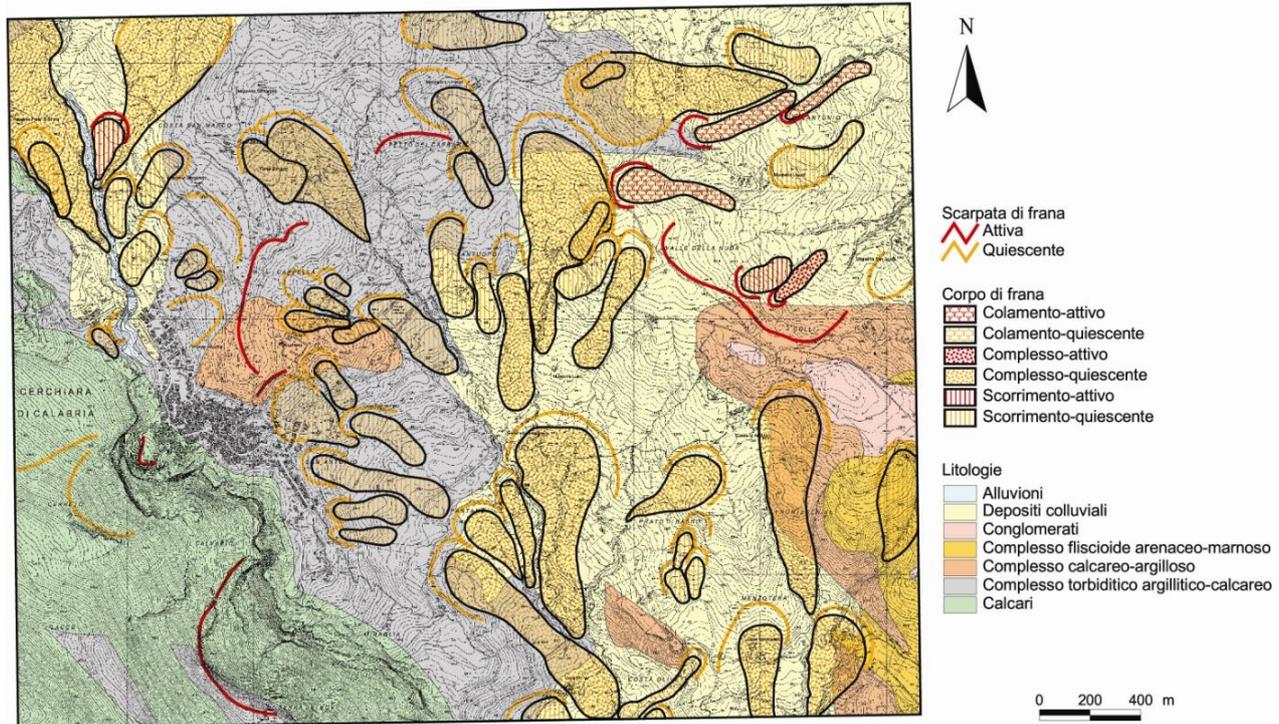


Figura 5 - Carta inventario delle frane nell'intorno del centro abitato di Cerchiara di Calabria (CS) (da Rago, 2012, modificato).

Le carte inventario sono realizzate tramite foto-interpretazione, indagini di campagna e integrazione con dati storici e riportano informazioni di base relative alla tipologia di frana e alla sua attività (Fig.5) e, in alcuni casi, informazioni riguardanti lo spessore del materiale coinvolto nel movimento, l'età del dissesto, etc. L'approccio metodologico per la stesura delle carte inventario di un'area si avvale della sinergia tra i metodi della geomorfologia applicata ed evolutiva, delle tradizionali tecniche di riconoscimento delle frane (costituite dall'analisi di foto aeree e di elaborati cartografici) e del rilevamento geomorfologico. Basandosi su tale approccio metodologico, lo studio si articola in fasi distinte successive ed interattive (Fig.6):

- Analisi geomorfologica preliminare per la definizione delle caratteristiche di “fondo” della morfoevoluzione del rilievo e dei morfotipi significativi più direttamente connessi all’evoluzione per frana;
- Elaborazione ed interpretazioni di dati geognostici ed inclinometrici relativi a sondaggi eseguiti in diverse aree e in corrispondenza dei principali corpi di frana riconosciuti;
- Interpretazione anche comparata di foto aree a diversa scala e di diversa età per la precisazione del tipo e dell’entità dei processi denudazionali presenti sui versanti, per la localizzazione e tipizzazione dei singoli fenomeni franosi e del loro stato di attività, nonché per il loro rapporto con le altre forme del rilievo;
- Controllo sul terreno per la discriminazione dei dati acquisiti nelle fasi di indagini precedenti e per la verifica diretta dei parametri litostratigrafici delle successioni in sede e dei materiali coinvolti dalle frane; inoltre dei rapporti di questi ultimi con i depositi legati ad altri processi geomorfici.
- La carta inventario fornisce la base per una previsione spaziale e tipologica dei fenomeni franosi e permette l’identificazione delle situazioni passibili di riattivazione e possono essere utilizzate come elementari forme di carte della suscettibilità dei fenomeni franosi.

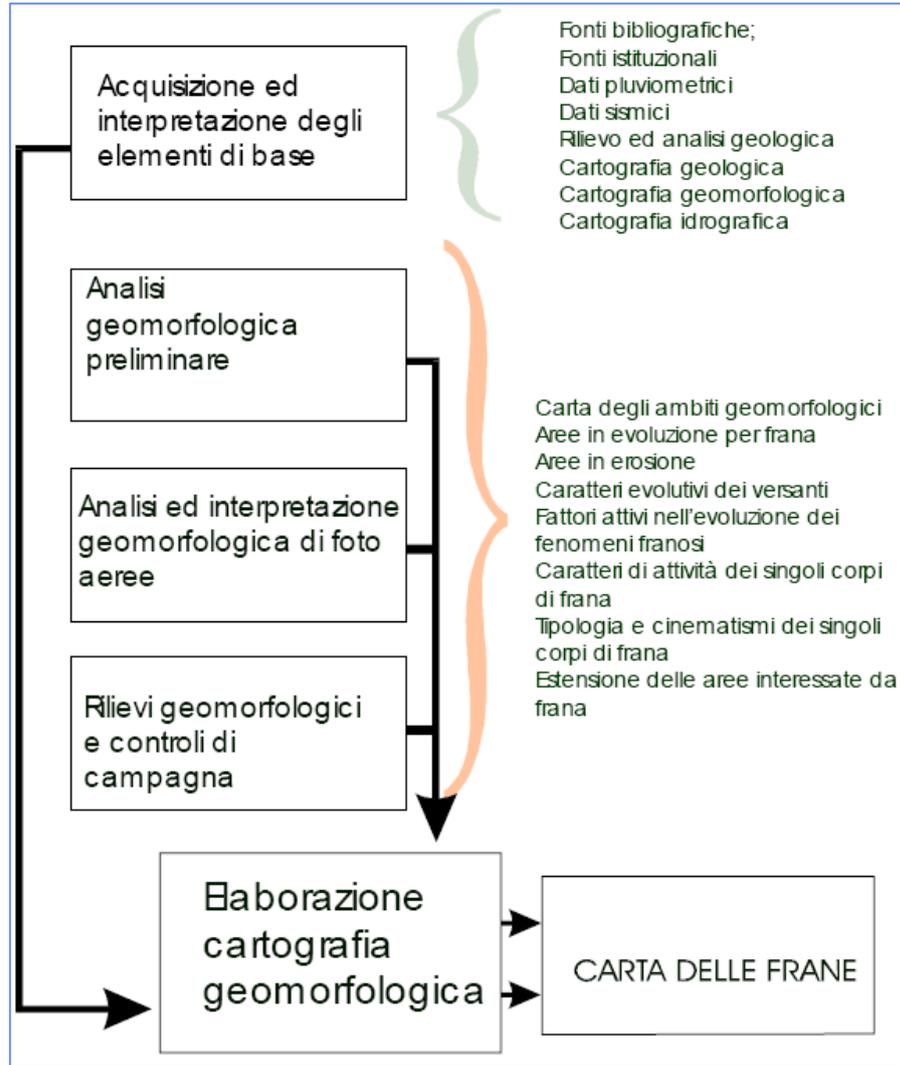


Figura 6 - Schema metodologico per la stesura della carta inventario delle frane.

I parametri che più spesso vengono indicati nell'elaborazione della carta inventario delle frane sono i seguenti:

- Tipologia di movimento;
- Materiale coinvolto;
- Stato di attività;

- Estensione areale;
- Profondità stimata;
- Direzione del movimento;
- Grado di certezza nell'identificazione;
- Velocità stimata;
- Aree di richiamo o di propagazione;
- Aree potenzialmente instabili.

Alla rappresentazione cartografica dei fenomeni può essere associato un codice al quale può essere riferita una scheda di descrizione in cui sono riportati i dettagli, rilevabili sul terreno o attraverso ricerche storiche, che non possono essere rappresentate efficacemente in forma cartografica. A tale fine risultano utili i sistemi informativi territoriali (GIS), i quali oltre a permettere l'associazione di banche dati ad elementi geografici, consentono un rapido e costante aggiornamento delle informazioni.

Dalla carta inventario le informazioni in termini di pericolosità si possono ottenere attraverso valutazioni soggettive, basate sull'esperienza del rilevatore. Tali carte sono documenti che rappresentano lo stato della natura ma, dall'interpretazione di tali mappe, è possibile derivare i parametri per quantificare l'intensità o la pericolosità. Il passo successivo è la zonazione dei versanti, attualmente non interessati da fenomeni franosi, in modo da prevedere anche le frane di prima generazione.

Metodi geomorfologici

I metodi geomorfologici sono metodi diretti, in quanto la pericolosità da frana è determinata direttamente sul terreno, dall'analisi dei fenomeni franosi individuati e dei processi ad essi connessi. Esso si basa su un attento riconoscimento della morfologia esistente, partendo dal presupposto che instabilità pregressa condiziona gli equilibri futuri di un versante. È sicuramente un approccio soggettivo in quanto la pericolosità di un sito è definita direttamente dall'operatore facendo affidamento sulla propria esperienza; è, infatti, un esperto a decidere sul grado di pericolosità di un sito osservando direttamente lo stato della natura e interpretando gli scenari futuri. Il metodo più conosciuto appartenente a questa famiglia è l'analisi geomorfologica e rappresenta il più semplice dei metodi qualitativi. Il dato di partenza è una carta inventario delle frane, alla quale si giunge tramite fotointerpretazione, lavoro di campagna e informazioni storiche.

La carta della pericolosità spaziale si ottiene valutando soggettivamente la predisposizione all'instabilità dei versanti, sulla base delle informazioni raccolte e sintetizzate principalmente nella carta inventario dei fenomeni franosi (Fig.7). Attraverso un'accurata analisi dei fattori responsabili dell'insorgere di movimenti di versante e presenti nelle aree in cui essi sono già avvenuti, è possibile operare una zonazione del territorio ottenendo un quadro sintetico circa l'evoluzione futura dei fenomeni franosi.

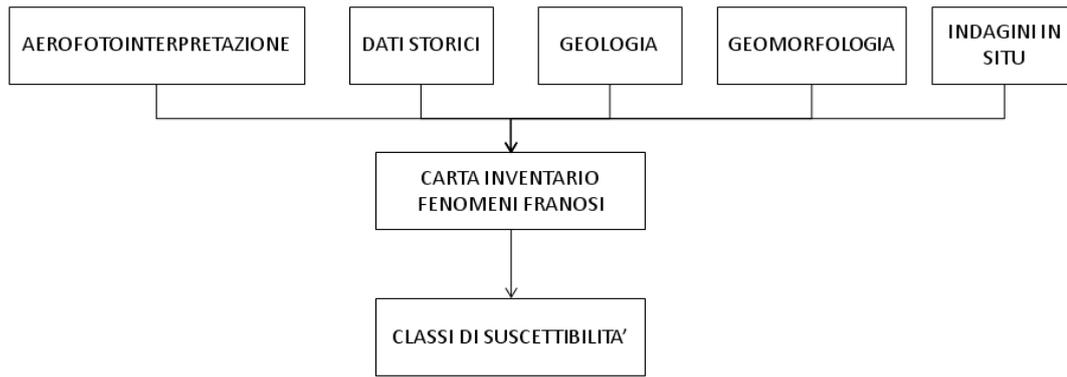


Figura 7 - Diagramma di flusso per la valutazione della suscettibilità da frana utilizzando l'approccio geomorfologico.

La valutazione e/o la zonazione è eseguita da operatori esperti basandosi sulla loro esperienza in situazioni simili senza delle chiare indicazioni sulle regole che hanno condotto alla valutazione e/o alla zonazione. In questo caso la mappa di stabilità deriva direttamente da carte geomorfologiche dettagliate.

Le carte di suscettibilità redatte solo su base geomorfologica hanno il pregio di essere documenti di rapida esecuzione. I principali svantaggi di questi approcci sono:

1. la soggettività nella scelta dei dati e delle regole che governano la stabilità dei pendii o il pericolo di instabilità: documenti attendibili richiedono operatori estremamente esperti e, inoltre, mappe redatte da operatori diversi sono difficilmente confrontabili;
2. l'uso di regole implicite piuttosto che esplicite che impediscono l'analisi critica dei risultati e rendono difficile aggiornare la valutazione con nuovi dati disponibili;
3. lunghe indagini in campo.

L'analisi geomorfologica permette una veloce valutazione della stabilità in una data area, può essere usata a qualsiasi scala e se necessario adattarla a specifici requisiti locali. Tale analisi in campo non richiede l'utilizzo dei GIS, infatti, in questo caso esso è utilizzato come un semplice programma grafico.

Tra i modelli geomorfologici applicabili a scala regionale la letteratura ne riporta alcuni puramente descrittivi, ma fondamentali per le operazioni di taratura dei modelli statistici, quali l'analisi della distribuzione delle aree in frana fondato sull'inventario degli eventi recenti; l'analisi dell'attività della frana basato sul confronto delle condizioni morfologiche esistenti in tempi diversi e l'analisi della densità di frana (DeGraff & Canuti, 1988). Tra gli altri modelli diretti, basati sull'osservazione diretta dei versanti e della loro stabilità, il metodo dell'analisi geomorfologica prevede la suddivisione dell'area in esame in sottoaree poligonali, contenenti aree aventi le stesse caratteristiche ed il conferimento, da parte dell'operatore, di una classe di stabilità a ciascun poligono, basandosi sulla propria esperienza. Tra i diversi esempi riportati in letteratura possiamo ricordare le carte di densità dei dissesti (Wright et al., 1974), l'interpretazione multitemporale di foto aeree (Canuti et al. 1979; Cardinali et al., 2002), le carte di suscettività al dissesto basate sulla cartografia geomorfologica (Kienholz et al., 1983, 1988; Hansen, 1984; Rupke et al., 1988; Petley D.N., 2000) ed il metodo delle unità di paesaggio o *landscape units* (Van Western, 1993) nel quale il territorio viene suddiviso in aree aventi determinate combinazioni di geologia, forme del territorio, vegetazione e processi associati, nelle quali viene calcolata la distribuzione di movimenti franosi (Fig.8). In Italia possiamo ricordare, tra gli altri, il lavoro di Nardi et al. (1987) in cui le classi di pericolosità vengono suddivise sulla base di elementi geomorfologici, geologici e topografici.

Numerosi sono gli esempi di carte di pericolosità da frana realizzate su base essenzialmente geologica o geomorfologica (Papani & Tellini, 1973; Radbruch-Hall & Crowther, 1973; Malgot et al., 1973; Kienholtz, 1978; Rodriguez Ortis et al., 1978; Nilsen et al., 1979; Mahr & Malgot, 1979).

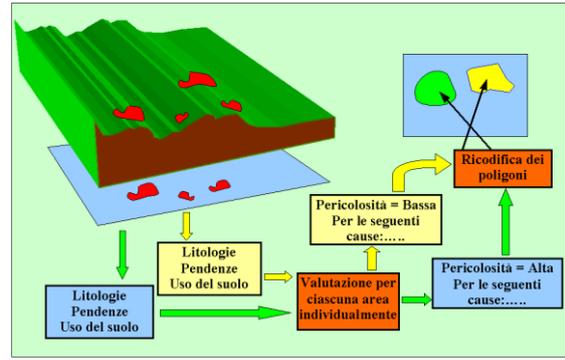


Figura 8 - Esempio di schema per la valutazione della pericolosità con approccio geomorfologico (da Van Westen, 1997).

Metodi euristici

Questi metodi si basano sia sull'attento riconoscimento della morfologia esistente sia sulla conoscenza a priori delle cause dei fenomeni franosi pesando ogni fattore predisponente in funzione della sua importanza nell'intero processo. L'oggettività dei modelli appartenenti a questo gruppo, basati essenzialmente sulla combinazione qualitativa di carte tematiche, è limitata sia dalla scelta dei fattori predisponenti, sia dalla scelta dei pesi da assegnare agli stessi.

La combinazione di mappe qualitative è un metodo euristico indiretto in cui l'esperto seleziona e cartografa i fattori predisponenti l'instabilità di un versante e, basandosi sull'esperienza personale, assegna ad ognuno di essi un peso. Le fasi della procedura sono le seguenti (Soeters & Van Western 1996) (Fig.9):

1. suddivisione di ogni fattore predisponente in un numero appropriato di classi;
2. attribuzione di un peso ad ogni classe;
3. classificazione dei parametri in funzione dei pesi assegnati alle relative classi;
4. sovrapposizione delle mappe "pesate";
5. elaborazione della mappa finale mostrante le varie classi di suscettibilità.

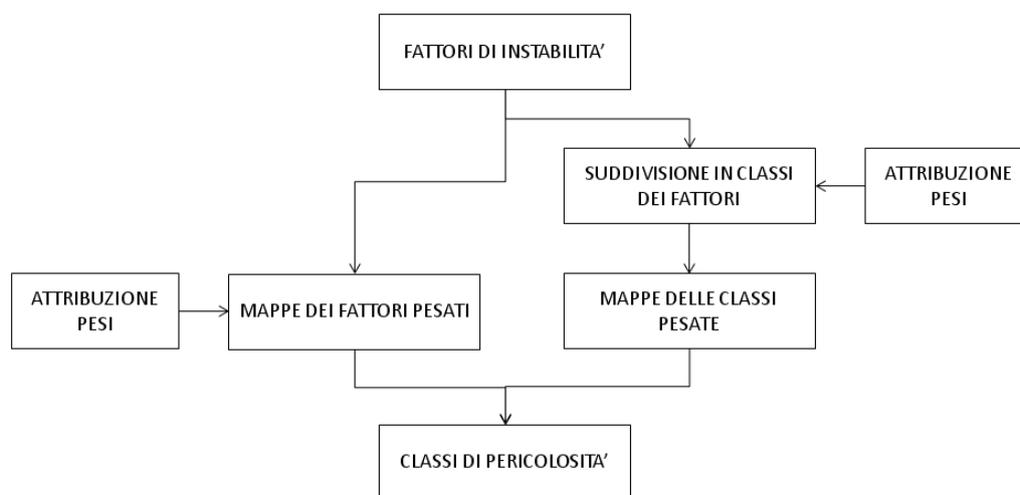


Figura 9 - Metodologia per la combinazione di mappe qualitative.

L'approccio euristico indiretto si ritrova nell'analisi delle classi di rischio (Amadesi & Vianello 1978; Anbalagan, 1992; Gee, 1992) dove le classi sono ottenute mediante la costruzione di algoritmi e l'assegnazione di pesi e punteggi ai diversi fattori predisponenti, definiti di volta in volta dall'operatore. Quelli utilizzati più di frequente sono la pendenza, il materiale di copertura, i processi geomorfologici passati ed in atto, la circolazione idrica sotterranea, lo stato di fatturazione delle rocce affioranti, la giacitura e la pendenza degli strati, ecc. Si costruiscono di conseguenza algoritmi semplici che correlano qualitativamente le caratteristiche dell'area, e algoritmi complessi che richiedono la valutazione dei pesi in base all'influenza che ogni fattore ha sulla stabilità. In quest'ultimo ambito si colloca il modello di Stevenson (1997).

In Italia l'espressione più nota di tali metodi è quella proposta da Amadesi et al. (1977) ed Amadesi & Vianello (1978) ed è stata adottata dalla Regione Emilia Romagna per la realizzazione della carta della propensione al dissesto idrogeologico. Il metodo prende in considerazione quattro tematismi (fattori predisponenti): litologia (divisa in 10 classi), pendenza dei versanti (5 classi), struttura e giacitura (9 classi) e uso del suolo (4 classi). Ogni classe è indicizzata con un peso che ne esprime l'influenza sulla stabilità. Dalla somma algebrica dei pesi riguardanti i quattro tematismi si ottiene una zonazione della stabilità dei versanti. Opportune correzioni e aggiustamenti sono effettuati in seguito per confronto con gli elementi geomorfologici, sismici e climatici presenti nell'area.

I principali vantaggi di questo approccio sono legati all'automazione delle operazioni sopra elencate tramite GIS con tecniche di gestione dati che vanno dall'acquisizione all'analisi finale e alla sua applicabilità a qualsiasi scala. Il limite principale della metodologia, consiste nella soggettività con la quale i fattori predisponenti la franosità sono scelti e pesati all'interno del modello come anche la difficoltà di estrapolare un modello sviluppato ed applicato in una certa area, ad altre realtà territoriali (Carrara, 1983). Inoltre molto spesso il documento di sintesi non rispecchia la distribuzione delle frane così come rilevabili attraverso indagini geomorfologiche, per cui la fase finale di aggiustamento per confronto con la carta inventario assume un ruolo sostanziale.

Per ovviare a tale inconveniente si può ricorrere a procedure statistiche per l'attribuzione dei pesi ed alla taratura del modello statistico sulla base del confronto con la carta geomorfologica di dettaglio. Il GNGFG (1987) ha proposto uno schema formale per la redazione di "carte della pericolosità connessa con l'instabilità dei versanti" che si basa sulla separazione rigorosa e sul confronto iterativo fra cause (fattori) ed effetti (fenomeni franosi) dell'instabilità dei versanti.

La carta geomorfologica o la carta inventario dei fenomeni franosi, diventa il documento base sul quale deve essere tarato ogni modello di sintesi dei fattori. L'analisi delle cause si esplica attraverso la redazione di carte tematiche di base dei fattori (es. carte dell'acclività, litologiche, giaciture, della fratturazione, idrogeologiche, dell'uso del suolo, ecc.). Parallelamente all'analisi delle cause, viene effettuata l'analisi degli effetti, mediante indagini geomorfologiche con le quali vengono descritte le forme e i processi, e viene tentata una ricostruzione della cronologia e dello stato di attività dei fenomeni. Dall'interpretazione della carta geomorfologica di base si ottiene una carta degli effetti dell'instabilità dei versanti, considerando solo gli elementi di maggior pericolo. Assegnando, per tentativi, dei pesi ad ogni classe di fattori, si ottiene una carta di sintesi, la quale è confrontata con la carta degli effetti. I pesi vengono quindi continuamente aggiustati attraverso un confronto iterativo fra cause ed effetti, in modo da ottenere una congruenza fra pesi assegnati ed effetti osservati. A questo punto la carta di sintesi dei fattori può essere direttamente impiegata per la zonazione della pericolosità (Fig.10).

Alcune varianti rispetto a questi metodi prevedono, per ciascuna unità omogenea, la stima della percentuale di area interessata da fenomeni franosi. La metodologia è pertanto oggettiva e riproducibile. Uno dei primi esempi di tale metodologia è proposto da Brabb et al. (1972) per la redazione della carta della

suscettibilità ai fenomeni franosi nella San Mateo County (California). La percentuale di area in frana è impiegata anche da Radbruch-Hall et al. (1976) per la carta della franosità degli Stati Uniti alla scala 1: 7.500.000. La densità dei fenomeni franosi può essere rappresentata mediante isoplete (Campbell, 1973; Wright et al., 1974) ovvero con curve di ugual percentuale di area in frana. Tale metodologia è stata adottata da Canuti et al. (1985a) e De Graff & Canuti (1988) per l'analisi della stabilità dei versanti nei depositi marini pliocenici della Toscana. Una metodologia più completa per l'analisi della distribuzione delle aree in frana, è stata proposta da Bosi (1978) e Bosi et al. (1985).

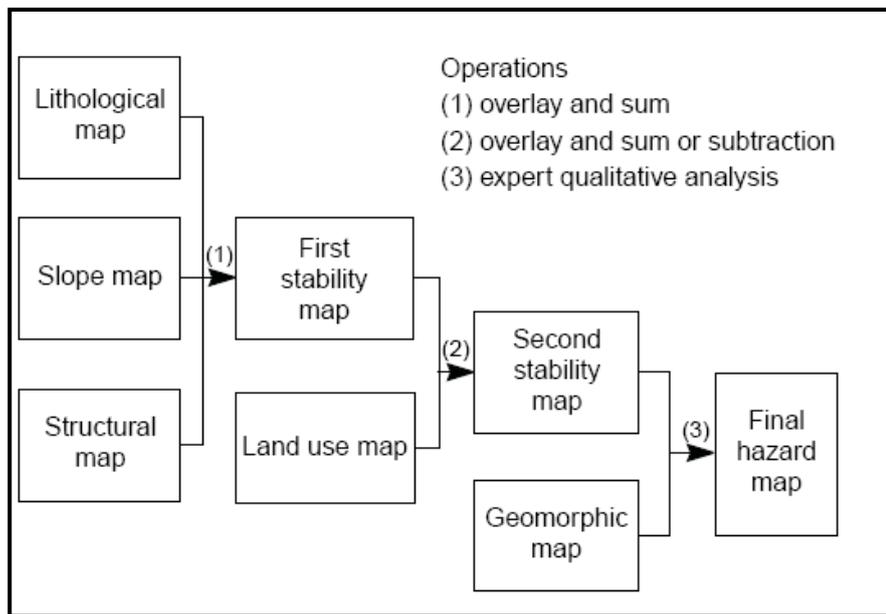


Figura 10 - Schematizzazione del metodo proposto da Amadesi & Vianello, 1978.

Guida et al., (1978, 1979) impiegano per l'indicizzazione delle carte tematiche dei fattori della franosità le percentuali di area in frana entro ciascun elemento territoriale omogeneo. Ad esempio nell'ambito del fattore litologia, il peso assegnato ad una determinata unità litologica è proporzionale al rapporto fra l'area di tale unità effettivamente coinvolta in fenomeni franosi e l'area totale di affioramento di tale unità.

Per i pendii in roccia e gli ammassi rocciosi in genere possono menzionarsi le metodologie del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LPC, 1978; Meneroud, 1978) e di Romana (1985) basato su una modifica della classificazione geomeccanica di Beniauskas (1974).

Metodi statistici

L'analisi statistica per la valutazione della suscettibilità da frana è spesso utilizzata, in particolar modo nelle analisi di suscettibilità a scala di bacino, perché permette una migliore comprensione delle relazioni esistenti fra fenomeni franosi, eventualmente distinte per tipologia, e fattori predisponenti e garantisce un minore grado di soggettività rispetto ai metodi euristici. I risultati ottenuti comparando i fenomeni franosi con i fattori predisponenti sono estrapolati a zone attualmente prive di fenomeni franosi ma dove esistono le medesime condizioni geo-ambientali. L'assunzione di partenza è che i fattori che hanno determinato nel passato un movimento di versante sono gli stessi che influiranno sull'innescamento dei dissesti futuri. La valutazione della pericolosità può considerarsi oggettiva, dal momento che i fattori predisponenti le frane e le loro interrelazioni vengono valutati su base statistica, anche se un certo grado di soggettività è introdotto sia al momento della scelta dei parametri da utilizzare, sia nel modo in cui vengono raccolti i dati. La bontà dei risultati è strettamente connessa alla quantità e all'attendibilità dei dati disponibili.

I principali vantaggi di questa metodologia sono legati alla possibilità di trattare i dati con tecniche GIS che rendono le operazioni relativamente facili ed attuabili anche su aree vaste. Infatti l'operatore può gestire al meglio i dati disponibili e validare l'importanza di ogni fattore sulla realizzazione della mappa finale di suscettibilità.

Di contro, vi è la principale difficoltà legata all'individuazione dei processi di instabilità e dei fattori predisponenti e/o innescanti. Infatti, l'approccio statistico necessita di una gravosa attività di raccolta dati al fine di valutare correttamente i fattori predisponenti da correlare con gli eventi franosi. Infine, l'applicazione del metodo richiede specifiche competenze statistiche per la gestione ed elaborazione di questi dati.

L'analisi statistica può essere di due tipi: bivariata e/o multivariata.

Metodi statistici bivariati

Nei metodi statistici bivariati viene valutato, individualmente, il contributo di ogni fattore predisponente (pendenza, litologia, uso del suolo, ecc.) nei confronti dei movimenti franosi. Ogni fattore viene cartografato e suddiviso in un certo numero di classi, dopodiché si combina con la carta inventario delle frane, ottenendo una probabilità condizionata della presenza o assenza di frana. In generale l'analisi consiste nel calcolare la densità delle aree in frana rispetto all'area occupata da ogni classe di ogni singolo fattore predisponente; l'importanza o il peso di ogni classe appartenente ad un fattore viene calcolata singolarmente. La carta di suscettibilità da frana viene ottenuta sommando i valori normalizzati di ogni singola classe mediante operazione di *overlay mapping* in ambiente GIS. Per compiere tale analisi sono richieste le seguenti operazioni (Fig.11):

1. scelta dei parametri predisponenti l'instabilità e loro suddivisione in un numero appropriato di classi;
2. elaborazione della carta inventario delle frane;
3. sovrapposizione della carta inventario delle frane con le carte tematiche relative a ciascun parametro;
4. determinazione della densità di frana in ogni classe di ciascun parametro e definizione dei pesi da assegnare alle varie classi;
5. assegnazione dei pesi alle mappe relative a ciascun parametro;
6. sovrapposizione delle carte tematiche finali e calcolo della pericolosità o suscettibilità in ogni unità di terreno identificata.

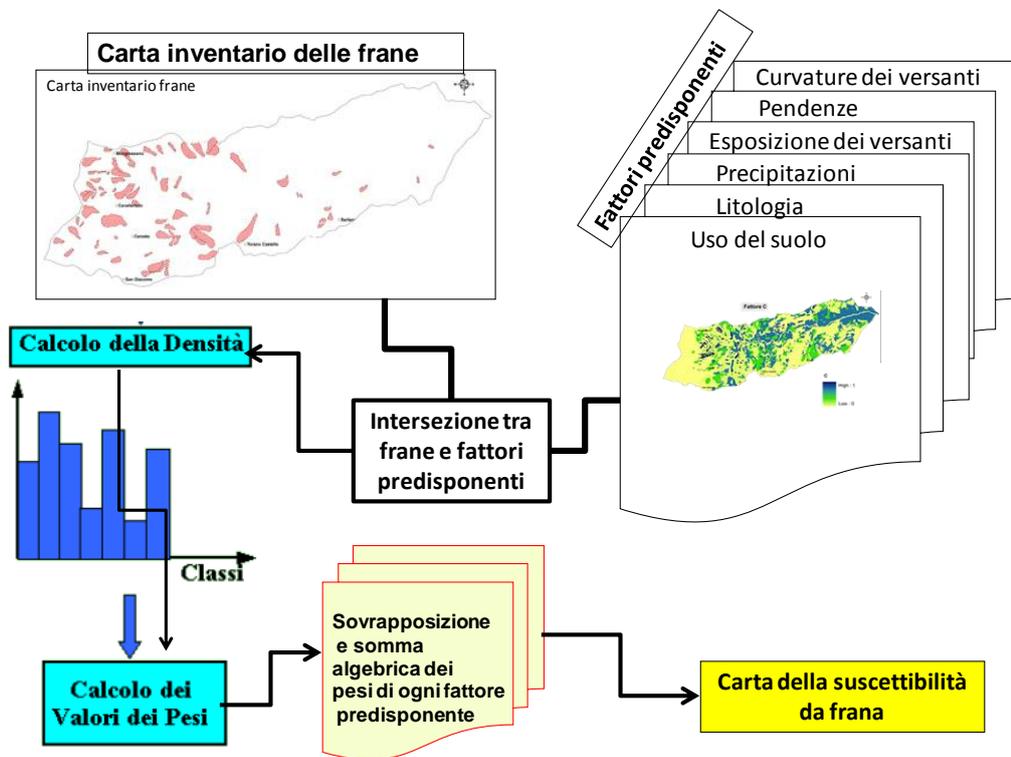


Figura 11 - Schema della metodologia dell'analisi statistica bivariata.

É anche possibile associare i singoli parametri per rappresentare una carta tematica delle unita geomorfologiche con caratteristiche comuni (**UCU**, *unique-condition units*), essendo ogni singola area frutto della combinazione fra le classi dei parametri considerati.

Es.: Si consideri un territorio con due sole litologie (granito e basalto), e due sole classi di pendenza (0 – 20%, 20 - 50%).

Dalla carta delle litologie e da quella delle pendenze (Fig.12 a, b), attraverso le combinazioni possibili delle classi dei parametri (Fig.12 c), si ottiene la carta delle **UCU**.

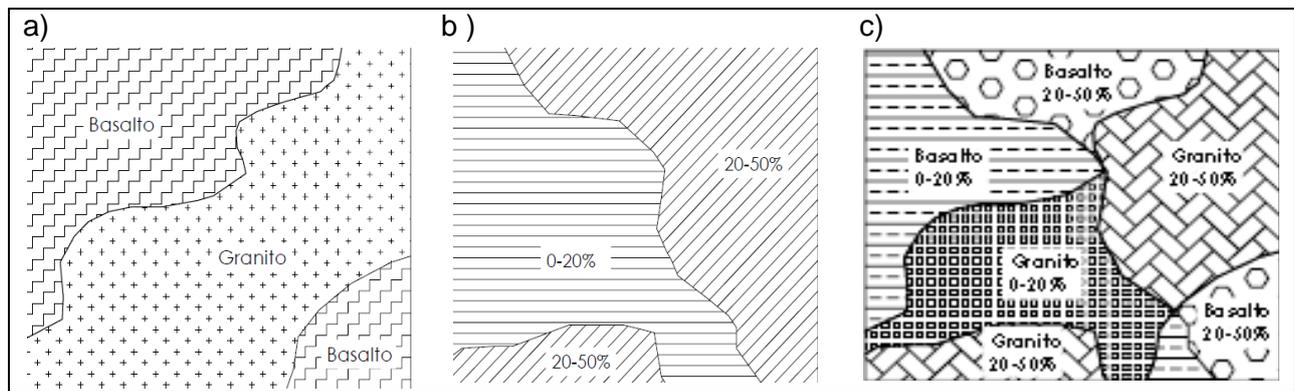


Figura 12 - a) Carta litologica; b) Carta delle pendenze; c) Carta delle UCU.

La regressione non sarà fatta su ogni singola classe di ogni parametro considerato, ma su ogni possibile combinazione della carta delle UCU. La scelta dei parametri da utilizzare e la loro suddivisione in classi sono operazioni molto critiche, in quanto inseriscono una certa soggettività al metodo. La metodologia di elaborazione della carta di pericolosità può essere quindi riassunta nella seguente maniera:

- classificazione di ogni singolo parametro in classi;
- individuazione delle UCU attraverso la combinazione di classi e fattori;
- calcolo del peso di ogni classe in base alla sua correlazione spaziale con i fenomeni franosi;
- somma dei vari pesi di ogni parametro e classificazione in un numero finito di classi di pericolosità spaziale.

Come già detto in precedenza, il primo e l'ultimo passo dipendono dalle decisioni dell'operatore; infatti la suddivisione dei parametri di input in classi è alquanto soggettiva, e lo è anche quella della carta risultante.

La scala media è la più appropriata per questo tipo di analisi. Il metodo non è abbastanza dettagliato per essere applicato a grande scala, e d'altra parte, a scala regionale è difficoltoso disporre di una cartografia dettagliata della franosità. Le analisi statistiche bivariate considerano una variabile dipendente (l'evenienza del fenomeno franoso) e una variabile indipendente, la classe del fattore predisponente considerato.

L'importanza di ogni fattore predisponente è analizzata separatamente. Combinazioni specifiche tra diversi fattori possono essere testate utilizzando il metodo delle *UCU*, producendo quindi un nuovo parametro. I metodi sono basati sull'assunzione che i fattori predisponenti al manifestarsi di un fenomeno franoso possano essere quantificati analizzando le relazioni spaziali tra fenomeni franosi e variabili utilizzate. L'unione di più parametri al fine di produrre una nuova variabile porta il dominio dell'analisi bivariata in una sorta di dominio multivariato.

Nelle analisi statistiche bivariate sono stati proposti diversi metodi per calcolare i pesi da assegnare ad ogni classe di ogni fattore predisponente la franosità; tra quelli maggiormente utilizzati, possiamo citare: *landslide susceptibility method* (Brabb, 1984; Van Westen, 1992, 1993), *Information value method* (Kobashi & Suzuki, 1988; Yin & Yan, 1988), *weight of evidence method* (Spiegelhalter, 1986; Bonham-Carter, 1996). Di seguito verranno descritti i tre metodi.

Landslide susceptibility method

Nell'analisi statistica bivariata un metodo semplice ed utile per determinare l'importanza di una variabile rispetto ad un fenomeno franoso è quello di intersecare la carta della distribuzione della variabile (fattore predisponente) nell'area studiata con quella delle aree interessate da frane. Per ogni classe di ogni singolo fattore predisponente sono calcolati due tipi di densità. Densità areale: è espressa dal rapporto tra l'area in frana all'interno di una classe della variabile considerata e l'area totale della classe.

$$D = Af_x/A_x$$

dove: D rappresenta la densità areale, Af_x rappresenta l'area in frana presente all'interno della classe x considerata e A_x rappresenta l'area della classe x considerata.

Densità numerica: è espressa dal rapporto tra il numero di eventi franosi ricadenti all'interno dell'area occupata dalla classe della variabile considerata e la sua area espressa in Km^2 .

$$D_{number} = nF_x/A_x$$

dove: D_{number} rappresenta il numero di frane presenti all' interno della classe considerata, nF_x rappresenta il numero di frane presenti all'interno della classe x considerata e A_x rappresenta l'area, in Km^2 , della classe x considerata.

Per valutare l'influenza di ogni singola variabile, vanno introdotti i fattori pesati che si ottengono calcolando la differenza tra la densità delle frane per la classe x del parametro considerato e la densità totale nell'area studiata:

$$W_{area} = Af_x/A_x - (\sum Af_x/\sum A_x)$$

Per la densità numerica il fattore pesato è analogamente espresso dalla seguente relazione:

$$W_{number} = nF_x/A_x - (\sum nF_x/\sum A_x)$$

Operativamente la scelta delle variabili può essere fatta principalmente con due metodi; il primo è quello in cui è l'operatore a scegliere quali fattori predisponenti saranno utilizzati nell'analisi, e quindi la decisione è presa in base alle sue conoscenze dei fenomeni franosi in quell'area e alla sua esperienza. Il secondo metodo è quello in cui si sommano i pesi dei vari parametri scelti uno per volta, e si procede poi dopo ogni somma a confrontare il risultato con la carta dei fenomeni franosi. Se le perimetrazioni ottenute con la somma del parametro n sono peggiori di quelle ottenute precedentemente con il parametro $n-1$, il parametro viene scartato e si procede con il successivo.

Information value method

L'uso simultaneo di variabili numeriche e variabili qualitative crea spesso dei problemi in statistica. È questo il caso della zonazione di pericolosità franosa, in quanto si è in presenza di variabili numeriche quantitative, come la pendenza, e di variabili qualitative, come la litologia. Si può ovviare a questo problema trattando ogni classe di ogni singolo parametro come se fosse una variabile qualitativa che può assumere esclusivamente due stati: presente (1) o assente (0). Il metodo sviluppato da Yin & Yan (1988) calcola il "peso", per ogni classe di fattori predisponenti (esempio: litologia, pendenze, uso del suolo ecc.) che è sia definito dal logaritmo naturale della densità delle frane nella classe in esame, diviso la densità di tutte le frane nell'intera area di studio. Il metodo, dunque, è basato sull'applicazione della seguente formula:

$$W = \ln [DensClas/Densmap] = \ln [(NpixSi/NpixNi)/(\Sigma NpixSi/\Sigma NpixNi)]$$

dove W è il peso di ciascuna classe di parametri; $Densclas$ è la densità di frane entro la classe di parametri in esame, mentre $Densmap$ rappresenta la densità di frane nell'intera area. $Npix(Si)$ è il numero di *pixels* in frana entro la classe in esame, mentre $Npix(Ni)$ è il numero totale di *pixels* nella classe in esame; $\Sigma NpixSi$ è il numero totale di *pixels* in frana; $\Sigma NpixNi$ è il numero totale di *pixels* dell'area di studio.

La metodologia risulta semplice da implementare e abbastanza oggettiva. Tutti i dati necessari si ottengono tramite funzioni del sistema GIS che permette di “sovrapporre” e “incrociare” il *raster* delle carte inventario con i *raster* delle carte dei fattori predisponenti. Ad esempio, incrociando la carta delle frane con la carta delle classi di pendenza, si ottiene una mappa e una tabella in cui per ogni classe di pendenza viene valutato il numero di *pixels* in frana; proprio dalla tabella è possibile calcolare la densità di frane (indice W). Il logaritmo naturale impone che siano assegnati valori negativi dove la densità di frane è bassa e valori positivi dove la densità è alta.

Sommando i diversi “pesi” (W) derivanti dall'incrocio con tutti i fattori selezionati, si ottiene la carta della suscettibilità nella quale ad alti valori corrispondono alte probabilità di instabilità geomorfologica sui versanti. La carta così ottenuta avrà un *range* di valori continui da negativi a positivi.

Weight of evidence method

Questo metodo rientra nella categoria dei metodi di analisi probabilistica condizionale, ed è stato applicato con buoni risultati in vari campi, quali principalmente la ricerca mineraria (Bonham-Carter et al., 1990; Chung C.F and Agterberg F.P., 1980; Chung C.F and Keating P.B, 2002) e l'analisi del dissesto per frana (Agterberg, 1974; Neuland, 1976; Herbaugh et al., 1977; Bernknopf et al., 1988; Chung et al., 1988; Mark and Ellen, 1995). Il metodo dei *Weight of evidence* si basa principalmente sul teorema di *Bayes* (Morgan, 1968). Il teorema di *Bayes*, deriva da due teoremi fondamentali delle probabilità: il teorema della probabilità assoluta e il teorema della probabilità composta. Il teorema della probabilità assoluta dice che:

se: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ sono n eventi tra di loro compatibili ma che esauriscono tutti gli eventi possibili (per cui $A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots \cup A_n = S$ e B è un evento qualsiasi allora:

$$P(B) = \sum_i P(A_i) \times P(B|A_i)$$

in quanto:

$$B = (A_1 \cap B) \cup (A_2 \cap B) \cup (A_3 \cap B) \cup \dots \cup (A_n \cap B)$$

e dunque:

$$P(B) = \sum_i P(A_i \cap B)$$

In termini rigorosi, dato un insieme S dotato di una misura di probabilità P e dati due eventi A e B, con $P(B) > 0$, si definisce la probabilità di A condizionata a B come la misura di A nel sottospazio costituito dall'insieme B dotato della misura di probabilità. Dunque la probabilità che l'evento A si verifichi al verificarsi contemporaneo dell'evento B e data da:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Considerando un insieme di alternative A_1, A_2, \dots, A_n (partizione dello spazio degli eventi) si trova la seguente espressione per la probabilità condizionata:

$$P(A_1|B) = \frac{P(B|A_1) \times P(A_1)}{P(B)} = \frac{P(B|A_1) \times P(A_1)}{\sum_{i=1}^n P(B|A_i) \times P(A_i)}$$

Il teorema venne presentato nel 1763 nell'articolo *Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances* di Thomas Bayes, pubblicato postumo in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Alcuni anni dopo (nel 1774) lo stesso teorema venne formulato da Pierre Simon Laplace che probabilmente non era a conoscenza del lavoro di Bayes. L'importanza di questo teorema per la statistica è tale che la divisione tra le due scuole (statistica bayesiana e statistica frequentista) nasce dall'interpretazione che si dà al teorema stesso. Il metodo dei *Weight of Evidence* prevede, come primo passo, di calcolare la probabilità a priori che nel territorio si determini una frana; questa è ottenuta mettendo a rapporto l'area in frana presente su tutto il territorio con l'area totale del territorio stesso. I pesi per la presenza, l'assenza o la mancanza di una variabile sono aggiunti alla probabilità a priori, ottenendo quindi una

mappa delle probabilità a posteriori della suscettività a franare del territorio considerato.

$$P_f = \frac{A_f}{A_t}$$

dove:

P_f = Probabilità a priori che sul territorio si manifesti una frana.

A_f = Area in dissesto in tutto il territorio

A_t = Area totale del territorio

Per ragioni matematiche è più conveniente esprimere la probabilità come rapporti di probabilità:

$$O_f = \frac{P_f}{1 - P_f} = \frac{\frac{A_f}{A_t}}{1 - \frac{A_f}{A_t}} = \frac{\frac{A_f}{A_t}}{\frac{A_t - A_f}{A_t}} = \frac{A_f}{A_t - A_f}$$

Un tematismo qualsiasi composto da un numero n di classi può essere comunque scomposto in n tematismi binari che indichino la presenza o l'assenza di quella particolare classe. Es. Carta geologica con tre litologie che può essere scomposta in tre carte binarie, in ognuna delle quali si ha la presenza di una litologia e l'assenza delle altre.

Se si considera una certa caratteristica del territorio, ad esempio la pendenza, possiamo suddividere il territorio in sottodomini omogenei in cui questo parametro è costante. Considerando uno di questi sottodomini (Es. V_i = c lasse di pendenza 20-35%), le possibili combinazioni tra esso e il parametro franosità sono le seguenti:

$V_i \cap F$ Variabile presente e franosità presente

$\bar{V}_i \cap F$ Variabile assente e franosità presente

$V_i \cap \bar{F}$ Variabile presente e franosità assente

$\bar{V}_i \cap \bar{F}$ Variabile assente e franosità assente

La probabilità a priori di trovare una certa classe di un certo tematismo nel territorio è:

$$P_v = \frac{T_v}{A_t}$$

dove: T_v = Area totale occupata da una certa classe di un certo parametro (Es: Classe di pendenza 20-35%). La probabilità a di non trovare una certa classe di un certo tematismo nel territorio è:

$$\overline{P}_v = \frac{A_t - T_v}{A_t}$$

La probabilità condizionale di trovare un'area in frana, data una certa classe di un certo tematismo, e data dal rapporto tra la percentuale di area occupata dai fenomeni di dissesto ricadenti all' interno del territorio di una certa variabile e l'area totale occupata dalla variabile. (Es. Area in frana nella classe di pendenza 20-35% fratto area totale occupata dalla classe 20-35%), con riferimento alle possibili combinazioni del parametro T_v e dell'area in frana A_f (Tab.9), si può scrivere:

$$P(T_v \cap A_f) = \frac{T_v \cap A_f}{A_t}$$

$$P\{A_f | T_v\} = \frac{P(T_v \cap A_f)}{P_v} = \frac{\frac{T_v \cap A_f}{A_t}}{\frac{T_v}{A_t}} = \frac{T_v \cap A_f}{T_v}$$

In maniera simile si ottengono le seguenti probabilità condizionali:

$$P\{\overline{A_f} | T_v\} = \frac{T_v \cap \overline{A_f}}{T_v}$$

$$P\{A_f | \overline{T_v}\} = \frac{\overline{T_v} \cap A_f}{\overline{T_v}}$$

$$P\{\overline{A_f} | \overline{T_v}\} = \frac{\overline{T_v} \cap \overline{A_f}}{\overline{T_v}}$$

Si possono anche elaborare le seguenti probabilità condizionali:

$$P\{T_v | A_f\} = \frac{P(T_v \cap A_f)}{P_f} \Rightarrow P(T_v \cap A_f) = P\{T_v | A_f\} \times P_f$$

$$P\{T_v | \overline{A_f}\} = \frac{P(T_v \cap \overline{A_f})}{\overline{P_f}} \Rightarrow P(T_v \cap \overline{A_f}) = P\{T_v | \overline{A_f}\} \times \overline{P_f}$$

		Variabile considerata	
		Presente	Assente
Frane	Presente	$T_v \cap A_f$	$\overline{T_v} \cap A_f$
	Assente	$T_v \cap \overline{A_f}$	$\overline{T_v} \cap \overline{A_f}$

Tabella 9 - Relazioni intercorrenti tra la presenza o l'assenza delle frane e di una variabile binaria.

Sostituendo, in accordo con il teorema di *Bayes*, si ottiene:

$$P\{A_f | T_v\} = \frac{P(T_v \cap A_f)}{P_v} = \frac{P\{T_v | A_f\} \times P_f}{P_v}$$

$$P\{\overline{A_f} | T_v\} = \frac{P\{T_v | \overline{A_f}\} \times \overline{P_f}}{P_v}$$

Da cui si possono ricavare le seguenti espressioni:

$$P\{A_f | T_v\} = \frac{P\{T_v | A_f\} \times P_f}{P_v} \Rightarrow P\{T_v | A_f\} = \frac{P\{A_f | T_v\}}{P_f} \times P_v$$

$$P\{\overline{A_f} | T_v\} = \frac{P\{T_v | \overline{A_f}\} \times \overline{P_f}}{P_v} \Rightarrow P\{T_v | \overline{A_f}\} = \frac{P\{\overline{A_f} | T_v\}}{\overline{P_f}} \times P_v$$

Sostituendo in queste espressioni le equazioni ricavate precedentemente, si ottiene:

$$P\{T_v | A_f\} = \frac{P\{A_f | T_v\}}{P_f} \times P_v = \frac{T_v \cap A_f}{\frac{T_v}{A_f}} \times \frac{T_v}{A_t} = \frac{T_v \cap A_f}{T_v} \times \frac{T_v}{A_t} \times \frac{A_t}{A_f} = \frac{T_v \cap A_f}{A_f}$$

$$P\{T_v | \overline{A_f}\} = \frac{P\{\overline{A_f} | T_v\}}{\overline{P_f}} \times P_v = \frac{T_v \cap \overline{A_f}}{\frac{T_v}{\overline{A_f}}} \times \frac{T_v}{A_t} = \frac{T_v \cap \overline{A_f}}{T_v} \times \frac{T_v}{A_t} \times \frac{A_t}{\overline{A_f}} = \frac{T_v \cap \overline{A_f}}{\overline{A_f}}$$

I pesi sono definiti dalle seguenti espressioni:

$$W^+ = \ln \frac{P\{T_v | A_f\}}{P\{\overline{T_v} | A_f\}} = \ln \left(\frac{\frac{T_v \cap A_f}{A_f}}{\frac{\overline{T_v} \cap A_f}{A_f}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Area in frana nella classe considerata}}{\text{Area in frana totale}}}{\frac{\text{Area non in frana nella classe considerata}}{\text{Area non in frana totale}}} \right)$$

$$W^- = \ln \frac{P\{\overline{T_v} | A_f\}}{P\{T_v | A_f\}} = \ln \left(\frac{\frac{\overline{T_v} \cap A_f}{A_f}}{\frac{T_v \cap A_f}{A_f}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Area in frana nelle altre classi}}{\text{Area in frana totale}}}{\frac{\text{Area non in frana nelle altre classi}}{\text{Area non in frana totale}}} \right)$$

da cui:

$$\ln O_T \{A_f | T_v\} = W^+ + \ln O_f$$

$$\ln O_T \{A_f | \overline{T_v}\} = W^- + \ln O_f$$

Nel caso si voglia analizzare l'influenza di più parametri sulla distribuzione dei fenomeni franosi nel territorio, sempre che questi soddisfino le condizioni di indipendenza statistica tra essi, si possono sommare algebricamente i pesi di ogni singolo parametro:

$$\ln O_T \{A_f | T_{v1}^k \cap T_{v2}^k \cap T_{v3}^k \dots \cap T_{vn}^k\} = \sum_{i=1}^n W_{vi}^K + \ln O_f$$

dove l'apice k può assumere i segni + o - a seconda della presenza o dell'assenza di quel parametro, e la probabilità a posteriori è espressa come:

$$P_{Post} = \frac{O}{1+O}$$

La differenza c tra il peso positivo e quello negativo, calcolata per ogni classe di ogni singolo parametro analizzato, è un ottimo indicatore della significatività con cui la sua presenza è correlabile con quella delle frane:

$$C = W^+ - W^-$$

Per ogni classe di ogni parametro (pendenza 20-35% per l'acclività, alluvioni per la geologia ecc). Il valore di C è solitamente compreso tra 0 e 2; quando il

valore tende a zero la presenza del parametro considerato non influenza la distribuzione delle frane sul territorio; viceversa, quando C si approssima a 2 o lo supera, la correlazione è molto significativa.

Analizzando i risultati da un punto di vista statistico possono essere individuati due fattori che originano un'incertezza nella validità dei risultati: la possibilità che alcune delle mappe utilizzate siano incomplete in alcune parti del territorio, e la varianza insita nei pesi calcolati. Ponendo la sommatoria della probabilità a posteriori di tutte le *unique condition units* moltiplicata per la loro area uguale a T, idealmente T dovrebbe essere circa uguale all'area in frana sul territorio. Nelle applicazioni pratiche accade frequentemente una situazione in cui $T > \text{Area in frana}$, solitamente a causa di una certa dipendenza condizionale tra le variabili; ma si può asserire che se T non supera l'area in frana per più di un 15%, l'indipendenza condizionale tra le variabili considerate esiste: questo test viene chiamato omnibus test.

Un altro test che ci permette di analizzare l'indipendenza condizionale delle variabili utilizzate è stato proposto da Agterberg & Cheng (2002); esso prevede di calcolare la differenza fra T e l'area in frana, confrontandola successivamente con la deviazione standard di T moltiplicata per 2,33 o 1,645, a seconda la si faccia con una probabilità del 95% o del 99%. Se la differenza è più piccola del prodotto, si può assumere di essere in condizioni di indipendenza condizionale e quindi statisticamente le probabilità calcolate non sono afflitte da fenomeni di "risonanza", e non sono sovrastimate.

Metodi statistici multivariati

L'analisi statistica multivariata dei fattori che si ipotizza abbiano una certa influenza sul manifestarsi dei movimenti franosi, può indicare il contributo relativo di ciascuno di questi parametri al manifestarsi di un evento franoso nell'unità di terreno omogenea esaminata. L'analisi, come si è visto per tutti i metodi statistici, è basata sulla presenza o sull'assenza di fenomeni franosi all'interno dell'unità di terreno omogenea considerata. Nell'analisi statistica multivariata, tutti i fattori predisponenti le frane vengono analizzati per mezzo di tecniche di regressione multipla, o regressione logistica, oppure vengono incrociati con la carta inventario delle frane, stabilendo delle correlazioni per le aree stabili e per quelle instabili con analisi discriminanti. Esempi di analisi statistiche di questo tipo sono stati presentati per primi in Italia da Carrara (1983) e da Carrara et al., 1990, 1991).

La procedura consiste in diverse fasi inizialmente applicate in un'area campione e successivamente, dopo aver verificato il risultato ottenuto, la procedura viene estesa in tutta l'area in esame (Fig.13):

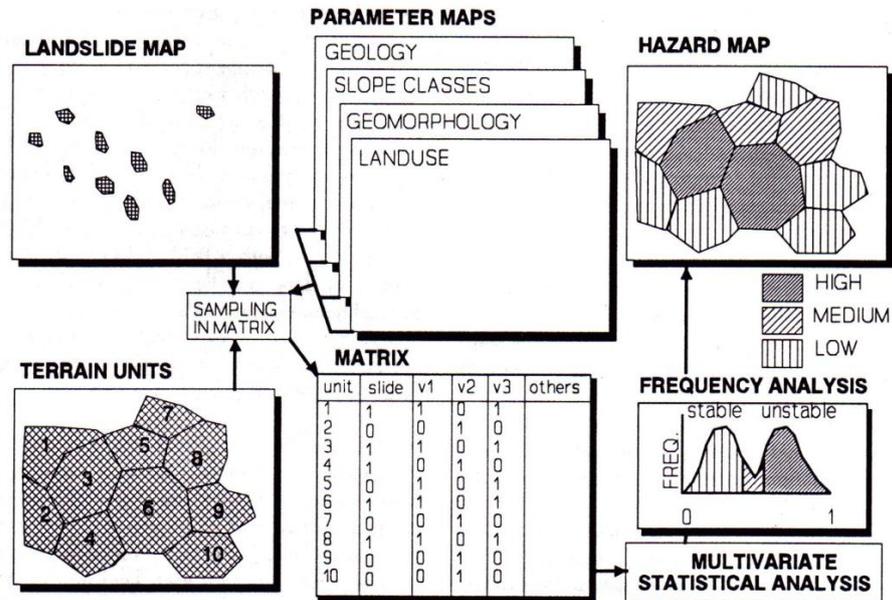


Figura 13 - Metodologia dell'analisi statistica multivariata
(da Soeters R. & Van Westen C. J., 1996).

I seguenti passi sono necessari per implementare un'analisi statistica multivariata su una data area:

- Scelta dei fattori predisponenti da analizzare: nel caso questi siano variabili di tipo qualitativo vanno trasformati in variabili numeriche (presenza o assenza di un certo parametro, o mappa che indica per ogni unità di terreno omogenea la percentuale di copertura della variabile sull'area totale dell'unità).
- Intersezione delle varie mappe dei fattori analizzati con la carta dei fenomeni franosi, dividendo poi i risultati in due gruppi: aree che presentano fenomeni franosi e aree che non li presentano.
- Analisi statistica dei due gruppi ottenuti dall'operazione precedente.
- Produzione della zonazione di pericolosità utilizzando i pesi ottenuti dall'analisi statistica.

Nell'applicazione di metodi di analisi statistica multivariata, per la valutazione della suscettibilità da frana, vengono introdotte notevoli semplificazioni; i dati richiesti da queste metodologie statistiche dovrebbero avere una distribuzione normale, e poiché questo non è sempre possibile, vengono a volte utilizzate delle distribuzioni logaritmiche per trasformare i dati, ed ottenere distribuzioni normali.

Regressione multipla

Nelle Scienze della Terra, il più conosciuto e usato metodo statistico appartenente alla categoria delle analisi statistiche multivariate è quello delle regressioni multiple. L'equazione generale è la seguente:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_n X_n$$

La variabile dipendente Y rappresenta la presenza (1) o l'assenza (0) dell'evento franoso. Le variabili indipendenti X rappresentano la presenza ovvero l'assenza del fattore predisponente (litologia, pendenza, uso del suolo, ecc.). I coefficienti numerici b_n sono i coefficienti parziali della regressione. Sono utilizzati alcuni metodi per valutare il risultato della regressione:

R^2 : Un fattore che ci indica la bontà dell'approssimazione della regressione.

SE: Errore standard della stima: deviazione standard dei valori osservati della variabile dipendente rispetto a quelli predetti.

Analisi discriminante

Un secondo modello di analisi statistica multivariata è quello dell'analisi discriminante. L'obiettivo dell'analisi discriminante è trovare la migliore discriminazione tra due gruppi (aree stabili e aree instabili). Questa è l'equazione generale:

$$D_s = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + \dots + B_n X_n$$

Le variabili indipendenti X rappresentano la presenza ovvero l'assenza del fattore predisponente (litologia, pendenza, uso del suolo, ecc.). I coefficienti numerici B_n , sono i coefficienti dell'analisi discriminante.

Dato un campione suddiviso in gruppi sulla base di una variabile dipendente qualitativa, l'analisi discriminante studia le differenze che esistono fra i vari gruppi e determina la probabilità che una certa entità (individuo o oggetto), che presenta certe caratteristiche, appartenga ad un particolare gruppo o classe.

Regressione logistica

Tra i metodi di statistica multivariata quando le variabili che corrispondono ai fattori predisponenti non soddisfano le assunzioni di normalità, linearità ed omogeneità della varianza, la regressione logistica è generalmente considerata una tecnica efficace (Cox, 1958). L'obiettivo di tale approccio è trovare il miglior adattamento che permetta di descrivere la relazione esistente tra una variabile dipendente dicotomica (0-1) ed un insieme di variabili indipendenti (Michie et al., 1994; Brown, 1998). Nel caso della suscettibilità da frana la variabile dicotomica è rappresentata dall'assenza o presenza di frane mentre le variabili indipendenti sono i fattori predisponenti che si ritiene influiscano sull'instabilità. Tramite l'applicazione della regressione logistica, la probabilità (P) di accadimento di una frana (Atkinson e Massari, 1998; Dai et al., 2001; Lee e Min, 2001) può essere stimata attraverso le formule:

$$P = \frac{1}{(1 + \exp^{-z})} \quad (1)$$

$$z = Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_n X_n \quad (2)$$

in cui z rappresenta una combinazione delle variabili, b_0 è l'intercetta del modello, n è il numero di variabili indipendenti, b_i ($i=1, 2, \dots, n$) identifica i coefficienti del modello mentre x_i ($i=1, 2, \dots, n$) le variabili indipendenti.

Attraverso una procedura iterativa, l'algoritmo di massima verosimiglianza della regressione logistica assegna i valori all'intercetta ed ai coefficienti delle variabili indipendenti; successivamente la variabile dipendente z viene trasformata per mezzo dell'equazione (1) in una probabilità.

Il contributo che ciascuna variabile fornisce all'instabilità è valutato esaminando il segno dei coefficienti assegnati a ciascuna variabile. Un coefficiente positivo indica che la variabile in esame incrementa la probabilità di avere frane; significato opposto ha un coefficiente negativo. Un coefficiente pari a zero indica che la variabile in esame non influisce sulla probabilità che si verifichi una frana.

La regressione logistica consente di valutare l'importanza relativa delle variabili sulla probabilità di accadimento di una frana tenendo conto delle

relazioni tra esse esistenti (multicollinearità) ed individuare ed eliminare quelle ininfluenti (non significative).

Esistono differenti metodi per l'introduzione delle variabili all'interno del modello che descrive la probabilità di accadimento di frane nell'area di studio. Tramite il metodo backward (eliminazione all'indietro) tutte le variabili inizialmente considerate vengono introdotte nel modello; esse sono poi rimosse una alla volta in base alla significatività dei rispettivi coefficienti. Tale procedura viene ripetuta ricorsivamente finché solamente le variabili con coefficiente statisticamente significativo rimangono all'interno del modello stesso e contribuiscono alla determinazione della probabilità P. Con il metodo forward (inserimento in avanti), partendo da un modello semplice con solo l'intercetta, le variabili vengono aggiunte una ad una sulla base della loro significatività.

Una volta selezionato il modello che meglio descrive i dati sulla base delle ipotesi formulate è necessario procedere alla valutazione della bontà del modello stesso, ricavando misure quantitative della capacità del modello di interpolare i dati osservati. I coefficienti ottimali trovati nella fase di calibrazione sono poi utilizzati per calcolare la suscettibilità da frana nell'intera area di studio.

Il vantaggio della regressione logistica rispetto al metodo della regressione multipla o dell'analisi discriminante è che le variabili possono essere sia continue (pendenza, parametri geotecnici, etc.) che categoriche (uso del suolo, litologia) o una combinazione di entrambe (Menard, 1995; Lee, 2005) e che i valori predetti possono essere interpretati come probabilità poiché sono compresi nell'intervallo 0-1 (Kleinbaum, 1991).

Reti neurali artificiali

Negli ultimi anni, un approccio innovativo per la valutazione della suscettibilità da frana, sebbene ancora poco utilizzato, è rappresentato dall'analisi di una rete neurale. Esempi di tale applicazione sono riportati nei lavori di Aleotti et al., 1996; Catani et al., 2005; Ermini et al., 2005; Ercanoglu, 2005; Caniani et al., 2008.

La teoria che sta alla base delle reti neurali si fonda sul tentativo di simulare il comportamento del cervello umano e, più precisamente, di imitarne i processi di apprendimento creando delle reti artificiali di neuroni (reti neurali) (Aleotti et al., 1996).

La **rete neurale** artificiale (**ANN, Artificial Neural Network**) è formata da un gran numero di unità indipendenti, connesse le une alle altre mediante dei collegamenti. Questo è simile alla struttura del nostro cervello, in cui le unità sono i **neuroni** e i collegamenti gli **assoni** e le **sinapsi** (Fig.14).

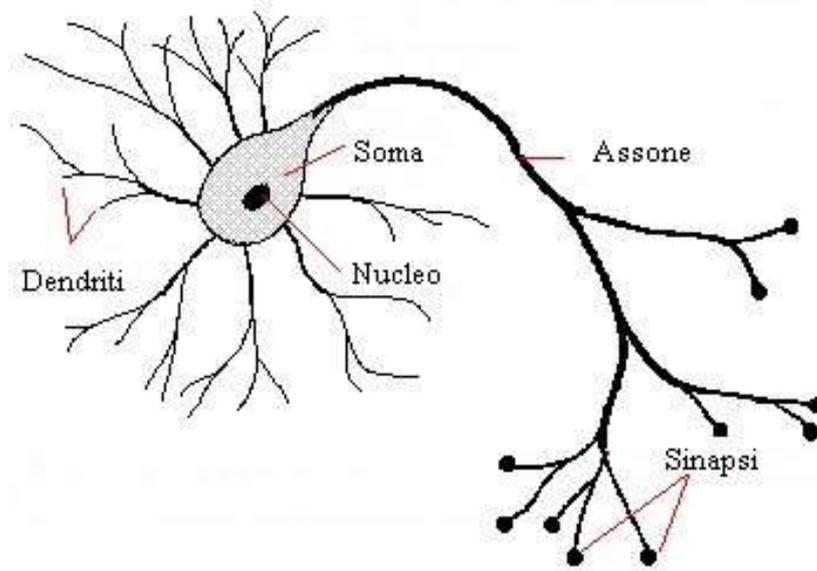


Figura 14 - Schema della struttura di un neurone biologico.

Nel cervello umano, un neurone raccoglie i segnali provenienti da altre cellule tramite una quantità di strutture lineari chiamate dendriti (fig. 4.8). Il neurone emette impulsi elettrici attraverso un sottile filamento, l'assone, che si divide in migliaia di diramazioni. All'estremità di ciascuna diramazione, una struttura della sinapsi trasforma l'attività dell'assone in fenomeni elettrici che inibiscono o eccitano l'attività dei neuroni collegati. Quando un neurone riceve un segnale eccitatorio abbastanza grande rispetto a quelli inibitorio, invia lungo l'assone un impulso di attività elettrica.

Un impulso (elettrico) viaggia all'interno del cervello seguendo i collegamenti: quando un neurone riceve l'impulso, se questo è abbastanza forte il neurone si "attiva" e a sua volta invia il segnale a tutti i neuroni ad esso collegati, che si comporteranno nella stessa maniera.

L'apprendimento avviene tramite modificazioni dell'efficienza con cui le sinapsi trasmettono i segnali da un neurone all'altro.

Una **ANN** funziona nello stesso modo: ogni unità è collegata ad altre unità, le quali, in presenza di uno stimolo (**input**) di sufficiente intensità dalle unità poste "prima" di esse, si attivano e inviano il segnale alle unità collegate. I collegamenti (o gli assoni, nel caso del cervello) hanno la capacità di attenuare il segnale, in modo che questo viaggi secondo percorsi diversi e in alcune "direzioni" si spenga (cioè non sia sufficiente ad attivare alcuni neuroni).

I suddetti neuroni ricevono in ingresso degli stimoli e li elaborano. Ciascuna unità, infatti, trasforma l'insieme dei segnali ricevuti in un unico segnale in uscita che viene trasmesso alle altre unità. La trasformazione è compiuta in due fasi (Fig. 15):

- ciascun segnale in ingresso è moltiplicato per il peso della connessione, e tutti questi ingressi pesati vengono sommati per ottenere una grandezza detta ingresso complessivo. Il peso indica l'efficacia sinaptica (intensità del collegamento) della linea di ingresso e serve a quantificarne l'importanza, un ingresso molto importante avrà un peso elevato, mentre un ingresso poco utile all'elaborazione avrà un peso inferiore. Si può pensare che se due neuroni comunicano fra loro utilizzando maggiormente alcune connessioni allora tali connessioni avranno un peso maggiore.
- l'unità applica una funzione di trasferimento che trasforma la somma dei segnali in ingresso nel segnale in uscita. Il comportamento di una rete artificiale di neuroni dipende sia dai pesi assegnati alle connessioni sia dalla funzione di trasferimento.

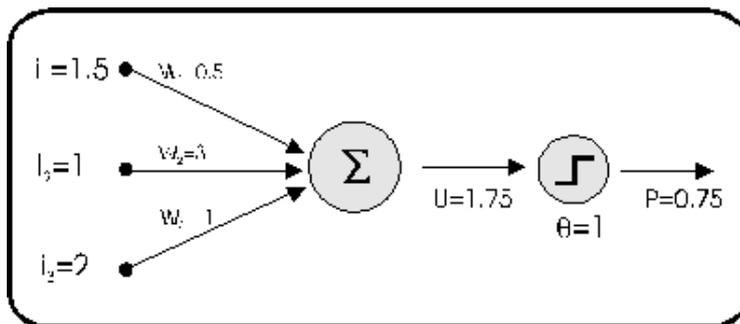


Figura 15 - Schema di funzionamento di una rete neurale.

Quest'ultima può essere una funzione a soglia o una funzione lineare ma, molto più spesso, è realizzata tramite una funzione non lineare quale la sigmoide:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

L'uso di tali funzioni conferisce alla rete la possibilità di simulare comportamenti non lineari. Per costruire una rete di neuroni che esegua un compito particolare, si deve stabilire come collegare tra loro le varie unità e si devono scegliere in modo opportuno i pesi delle connessioni. Sono queste ultime a stabilire se un'unità può influire su un'altra, mentre i pesi determinano l'intensità dell'influenza.

Il tipo più comune di reti neurali è quella **multistrato** (Fig. 16) (in cui, cioè, i nodi vengono posti in strati paralleli, generalmente 2 o 3, al massimo 4). In tali reti uno strato di unità di ingresso è collegato allo strato delle unità nascoste che a sua volta è collegato allo strato di unità di uscita.

Si riconosce uno strato di ingresso (*input layer*), uno o più strati nascosti (*hidden layer*) e uno strato di uscita (*output layer*) ciascuno dei quali può essere costituito da nodi.

Il primo strato si occupa di trattare gli ingressi in modo da adeguarli alle richieste dei neuroni, lo strato nascosto si preoccupa dell'elaborazione vera e propria e può essere composto anche da più colonne di neuroni, il terzo strato si preoccupa invece di raccogliere i risultati ed adattarli alle richieste del blocco successivo della rete neurale.

I nodi di ogni strato sono collegati a quelli dello strato successivo attraverso sinapsi o funzioni di trasferimento, ne segue che l'elaborazione delle informazioni avviene trasferendo in avanti gli stimoli che la rete ha sullo strato di ingresso per costituire il risultato sullo strato di output per cui il valore assunto da ogni nodo è determinato da una combinazione altamente non lineare dei valori assunti dai nodi dello strato precedente (*Feedforward network*) (Aleotti et al., 1996).

Queste reti possono essere anche molto complesse e coinvolgere migliaia di neuroni e decine di migliaia di connessioni.

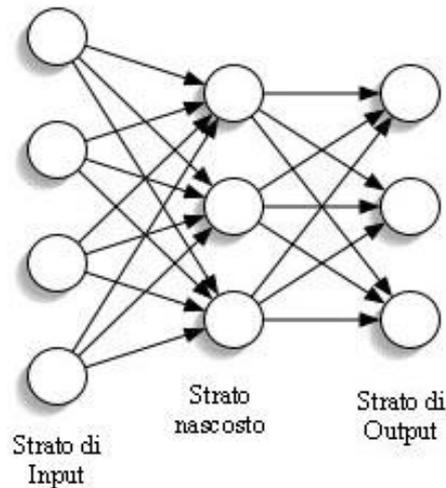


Figura 16 - Schema della rete neurale multistrato.

Una rete come quella descritta (Fig.16) ha due modalità di utilizzo: *learning* e *recall*.

- **Learning** (Fig.17): costituisce la fase vera e propria di apprendimento e consiste nel fornire ad una rete, i cui pesi delle connessioni siano inizializzati in maniera casuale, un insieme di coppie di stimoli, detti esempi di apprendimento, che rappresentano l'input alla rete e l'output che dalla rete ci si aspetta. Attraverso la presentazione di un gran numero di esempi la rete sintetizza, utilizzando particolari algoritmi di calcolo, la conoscenza insita nelle associazioni input/output e apprende le correlazioni memorizzandole nei pesi delle connessioni. Tale procedimento viene in genere realizzato mediante l'algoritmo di apprendimento detto di *Backpropagation* (Rumelhart et al., 1986). Esso consiste nel presentare una configurazione di ingresso alla rete e di calcolare l'errore numerico mediante una misura della distanza tra l'output che la rete fornisce e l'output desiderato. Tale errore permette di calcolare la modifica da apportare ai pesi delle connessioni che legano i neuroni dello strato nascosto con quelli dello strato di output in modo tale che l'errore stesso sia minimizzato. A questo punto il procedimento viene ripetuto percorrendo all'indietro la rete fino ad arrivare ai neuroni di input. Il risultato della presentazione alla rete di un esempio di apprendimento

consiste quindi nella modifica dei pesi delle connessioni in maniera coerente con l'informazione insita nell'associazione configurazione di ingresso/configurazione di uscita. In tal modo la rete modifica il proprio comportamento in funzione degli esempi di apprendimento. La ripetizione del singolo step di apprendimento con la presentazione di un gran numero di esempi comporta, in genere, la convergenza dei pesi della rete verso una configurazione stabile.

- **Recall:** permette di applicare la conoscenza sintetizzata nella precedente fase di apprendimento. Una rete neurale è in grado, successivamente, di dare risposte coerenti anche ad input che non erano stati presentati in fase di addestramento.

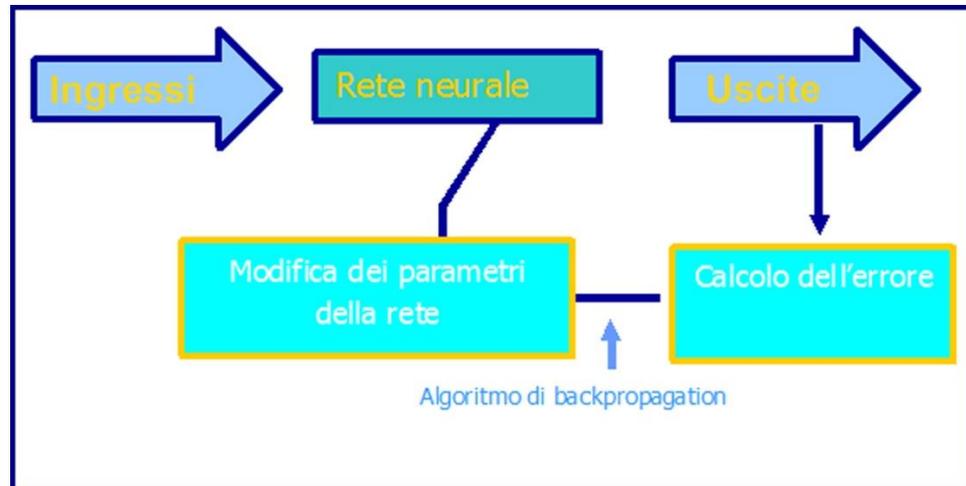


Figura 17 - Schema della fase di learning.

Dal punto di vista della modalità di apprendimento, è necessario operare una distinzione tra almeno tre diverse tipologie:

- Un apprendimento **supervisionato** (*supervised learning*), qualora si disponga di un insieme di dati per l'addestramento (*training set*) comprendente esempi tipici d'ingressi con le relative uscite loro corrispondenti: in tal modo la rete può imparare ad inferire la relazione che li lega. In seguito, la rete è addestrata mediante un opportuno algoritmo (tipicamente la *backpropagation* che è proprio un algoritmo d'apprendimento supervisionato), il quale usa tali dati allo scopo di

modificare i pesi ed altri parametri della rete stessa in modo tale da minimizzare l'errore di previsione relativo all'insieme di addestramento. Se l'addestramento ha successo, la rete impara a riconoscere la relazione incognita che lega le variabili di ingresso a quelle di uscita, ed è quindi in grado di fare previsioni anche laddove l'uscita non è nota a priori; in altri termini, l'obiettivo finale dell'apprendimento supervisionato è la previsione del valore dell'uscita per ogni valore valido dell'ingresso, basandosi soltanto su un numero limitato di esempi di corrispondenza (vale a dire coppie di valori *input-output*). Per fare ciò, la rete deve essere, infine, dotata di un'adeguata capacità di generalizzazione, con riferimento a casi ad essa ignoti. Ciò consente di risolvere problemi di regressione o classificazione.

- Un apprendimento **non supervisionato** (*unsupervised learning*), basato su algoritmi di addestramento che modificano i pesi della rete facendo esclusivamente riferimento ad un insieme di dati che include le sole variabili di ingresso. Tali algoritmi tentano di raggruppare i dati di ingresso e di individuare pertanto degli opportuni *cluster* rappresentativi dei dati stessi, facendo uso tipicamente di metodi topologici o probabilistici. L'apprendimento non supervisionato è anche impiegato per sviluppare tecniche di compressione dei dati.
- Un apprendimento **con rinforzo** (*reinforcement learning*), nel quale un opportuno algoritmo si prefigge lo scopo di individuare un certo *modus operandi*, a partire da un processo di osservazione dell'ambiente esterno; ogni azione ha un impatto sull'ambiente, e l'ambiente produce una retroazione che guida l'algoritmo stesso nel processo di apprendimento. Tale classe di problemi postula un agente, dotato di capacità di percezione, che esplora un ambiente nel quale intraprende una serie di azioni. L'ambiente stesso fornisce in risposta un incentivo o un disincentivo, secondo i casi. Gli algoritmi per il *reinforcement learning* tentano in definitiva di determinare una politica tesa a massimizzare gli incentivi cumulati ricevuti dall'agente nel corso della sua esplorazione del problema. L'apprendimento con rinforzo differisce da quello supervisionato poiché non sono mai presenti delle coppie *input-output* di esempi noti, né si procede alla correzione esplicita di azioni subottimali. Inoltre, l'algoritmo è focalizzato sulla prestazione in linea, la quale implica

un bilanciamento tra esplorazione di situazioni ignote e sfruttamento della conoscenza corrente.

Il problema principale di una rete neurale, invece, è che essa è una “scatola chiusa”, è cioè molto difficile comprenderne il funzionamento e ci si deve spesso limitare a fidarsi dell’addestramento, senza avere la possibilità di controllare cosa effettivamente avviene dentro la rete.

Metodi deterministici

Nel caso di frane che interessano la coltre superficiale di ridotto spessore, la valutazione delle condizioni di instabilità può essere effettuata facendo ricorso a metodi deterministici basati su modelli di tipo meccanico-idrologici.

L’approccio deterministico si basa sul calcolo del fattore di sicurezza dei pendii mediante analisi di stabilità dei versanti. Questo tipo di approccio è largamente utilizzato in ingegneria civile e geologia applicata ed è stato utilizzato per la valutazione e la mappatura della suscettibilità da frana soprattutto dopo l’introduzione dei GIS. Il modello geotecnico generalmente adottato consiste in un versante di lunghezza infinita e pendenza costante dove viene bilanciata la componente della forza di gravità lungo il pendio con la resistenza al taglio data dal criterio di Mohr-Coulomb.

I modelli deterministici possono essere mono, bi o tridimensionali, a seconda della complessità del sistema di equazioni utilizzato per la risoluzione delle leggi fisiche che descrivono le condizioni di rottura, lo spostamento e l’arresto dei corpi in frana.

La corretta applicazione di questo tipo di approccio prevede l’utilizzo di parametri geomeccanici del terreno (coesione e angolo di attrito interno), informazioni sulle pressioni interstiziali e la conoscenza della geometria di rottura del versante. Inoltre è necessario porre particolare attenzione alla scelta tra valori di resistenza di picco o valori residui da attribuire alla superficie di scivolamento durante l’analisi in funzione della tipologia di rottura attesa (neoformazione o riattivazione). Molto spesso i suddetti parametri sono difficili da ottenere a scala di bacino per cui il modello è applicato generalmente su aree di limitata estensione o a scala di versante. In alcuni casi l’incertezza con la quale, durante l’analisi, sono stabiliti e attribuiti i parametri, soprattutto la resistenza al taglio e il regime delle pressioni interstiziali, conduce a una errata stima del fattore di sicurezza, generalmente in senso cautelativo. A tal proposito si deve osservare che considerare nelle analisi condizioni di falda al piano campagna porta generalmente a risultati troppo cautelativi; d’altra parte invece tali condizioni

possono in qualche caso sovrastimare il grado di stabilità, per esempio in tutte le situazioni nelle quali si possono verificare processi che determinano sovrappressioni interstiziali, quali fenomeni di carico non drenato. Per fenomeni franosi innescati da precipitazioni intense questi modelli stimano il fattore di sicurezza per diversi scenari causate da piogge con vari tempi di ritorno, utilizzando fra i dati di input del modello la distribuzione spaziale delle pressioni interstiziali, all'interno dello spessore di suolo preso in esame.

Esistono due categorie di metodi principali che permettono di effettuare l'analisi di stabilità deterministica dei pendii. Alla prima categoria appartengono quei metodi d'analisi di stabilità che considerano il terreno come un corpo rigido e valutano esclusivamente l'equilibrio delle forze in gioco. Nella seconda categoria sono inseriti tutti quei metodi che permettono una valutazione dinamica della rottura del pendio mettendo in conto i fenomeni deformazionali. Nei metodi appartenenti alla prima categoria vi sono anche quelli definiti "dell'equilibrio limite globale". Nei metodi della seconda categoria sono compresi i metodi agli elementi finiti.

A) Metodi all'equilibrio limite globale

I metodi dell'equilibrio limite richiedono la conoscenza delle caratteristiche di resistenza al taglio dei terreni considerati, mentre trascurano la valutazione del comportamento sforzi-deformazioni. In generale il fattore di sicurezza F_s è definito come il rapporto tra forze resistenti massime mobilitabili e forze agenti lungo la superficie di rottura potenziale del pendio.

$$F_s = \text{Forze resistenti massime} / \text{Forze agenti}$$

Il fattore F_s è adimensionale, in quanto il divisore e il dividendo hanno le stesse dimensioni. Teoricamente valori superiori all'unità indicano una situazione di stabilità del versante, valori inferiori indicano instabilità. Per una corretta applicazione dei metodi deterministici sono necessarie queste condizioni: la conoscenza delle caratteristiche stratigrafiche, litologiche, idrogeologiche e geotecniche del versante analizzato. I metodi dell'equilibrio limite richiedono necessariamente la conoscenza delle caratteristiche di resistenza al taglio dei terreni interessati dal potenziale fenomeno di rottura, pur non considerando le interazioni in termini di sforzi-deformazioni. E' evidente che l'uso di questi metodi ha il vantaggio di classificare in senso assoluto la pericolosità, individuando le aree in cui le condizioni morfologiche e i parametri meccanici del terreno favoriscono l'instaurarsi di fenomeni franosi. L'utilizzo del fattore di sicurezza

permette, inoltre, di confrontare con estrema facilità le analisi prodotte su diverse aree semplicemente confrontando il valore numerico assunto dal fattore di sicurezza. Alla luce di quanto sopra esposto, è evidente il motivo per cui i metodi deterministici siano applicati più di frequente nelle analisi di stabilità di singoli versanti, piuttosto che nelle zonazioni di pericolosità geologica di vaste aree; infatti la misura di parametri geotecnici e il rilievo di sezioni stratigrafiche dettagliate sono per lo più fattibili a scala del singolo versante, ma risultano generalmente impossibili, per onerosità e tempi di realizzazione, nel caso di valutazioni di pericolosità su aree vaste. Tuttavia grazie all'utilizzo delle tecniche di elaborazione in ambiente GIS e alla disponibilità di software e hardware sempre più potenti, anche queste metodologie sono state utilizzate per valutare le condizioni di instabilità di vaste aree. Un esempio di tali applicazioni è il metodo SINMAP (*Stability Index Approach To Terrain Stability Hazard Mapping*) (Pack et al., 1998), implementato in un software GIS con approccio probabilistico che utilizza la teoria del pendio indefinito ed un modello idrologico.

Altri metodi su base fisica sono:

SHALSTAB – (SHAllow Landslide STABility model, Montgomery & Dietrich, 1994). E' un modello deterministico, utilizza gli algoritmi della teoria del pendio indefinito e del modello idrologico di O'Loughlin (1986).

TOPOG – (Vertessy et al., 1994). Simula la dinamica idrica nello spazio e nel tempo in contesti caratterizzati dalla presenza di terreni eterogenei e di vegetazione; i flussi sono considerati come unidimensionali. Le routine adottate possono essere utilizzate per simulare le condizioni di saturazione dei terreni, la propensione all'erosione accelerata, la stabilità di un pendio, oltre alle interazioni tra acque superficiali e sotterranee.

dSLAM – (Wu & Sidle, 1995). E' un modello deterministico che utilizza la teoria del pendio indefinito ed un modello idrologico considerando, inoltre, la variabilità della resistenza delle radici della vegetazione.

PISA – (Probabilistic Infinite Slope Analysis - Haneberg, 2004). Costituisce l'evoluzione in ambiente GIS di LISA (Hammond et al., 1992). Utilizza il modello del pendio indefinito nel quale i parametri geotecnici possono essere introdotti come costanti oppure come variabili in maniera casuale.

TRIGRS – (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability analysis - Baum et al., 2005). Il modello, di tipo deterministico, permette di valutare la variazione delle pressioni neutre nel terreno dovute all'aliquota di precipitazione relativa all'infiltrazione, mediante il metodo di Iverson (2000).

Valuta quindi la suscettibilità da frana in termini di Fattore di Sicurezza (F_s) attraverso il modello geotecnico del pendio indefinito.

I più diffusi sono SINMAP e SHALSTAB e verranno di seguito descritti più in dettaglio.

SINMAP

SINMAP (Stability INDEX MAPping) è applicato in ambiente GIS e consente la mappatura dell'indice di stabilità (SI) dei pendii.

Questo metodo è stato realizzato nel 1998 da Pack, D.G. Tarboton e C.N. Goodwin con lo scopo di fornire uno strumento per la mappatura della stabilità dei terreni che potesse completare i metodi soggettivi che venivano correntemente utilizzati nel settore forestale della British Columbia.

SINMAP si basa sull'accoppiamento di modelli idrologici topografici stazionari col modello di stabilità del pendio indefinito. SI, che è un valore numerico, esprime il fattore di sicurezza, utilizzato per suddividere l'area in esame in tante zone quanti sono gli intervalli di questo indice. SI è definito come la probabilità che una zona sia stabile assumendo come uniforme la distribuzione dei parametri considerati; si ricavano così alcuni *ranges* compresi tra 0 (zone più instabili) ed 1 (zone minimamente instabili).

Il valore numerico ottenuto si utilizza per classificare le condizioni di stabilità del versante per ogni cella della griglia che costituisce il modello digitale del terreno (DEM).

Per SINMAP, che opera solo valutando frane superficiali, i dati di input per la determinazione dell'indice di stabilità, definito come fattore di sicurezza (F_s) probabilistico, sono: fattori topografici, grandezze relative all'area specifica di drenaggio e parametri che caratterizzano le proprietà sia geotecniche che idrologiche del terreno (C - coesione, R - pioggia efficace, T -trasmissività) (Fig.18).

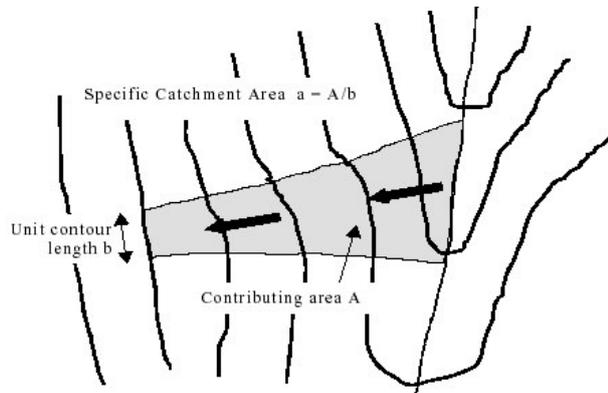


Figura 18 - Valutazione dell'indice di stabilità mediante un parametro idrologico (T/R) ed un parametro topografico locale (a/b) (Specific Catchment Area) che tiene conto dell'attitudine morfologica del bacino sotteso a concentrare il flusso nella sezione considerata (Pack et al., 1998)

Il fattore di sicurezza del modello di stabilità del pendio indefinito (rapporto tra le forze stabilizzanti e destabilizzanti) è dato da (da Hammond et al., 1992):

$$F_s = \frac{[Cr + Cs + \cos^2\theta [\rho_s * g(D - Dw) + (\rho_s * g - \rho_w * g) * Dw] * \tan\phi]}{D * \rho_s * g * \sin\theta * \cos\theta}$$

dove Cr è la coesione delle radici (N/m^2), Cs è la coesione del suolo (N/m^2), θ è l'angolo di inclinazione del pendio, ρ_s è la densità del terreno umido (kg/m^3), ρ_w è la densità dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità ($9,81 m/s^2$), D la profondità verticale del terreno (m), Dw l'altezza verticale della falda all'interno dello strato di terreno (m) e ϕ è l'angolo d'attrito interno del terreno. Per la stima del parametro Dw , SINMAP utilizza la legge di Darcy.

$$Dw = D * R/T * a/b \sin\theta$$

Le variabili topografiche sono automaticamente determinate dal DEM ed assegnate ad ogni cella, mentre i parametri T , R , C , ϕ sono riconosciuti come incerti e quindi considerati variabili tra un limite superiore ed uno inferiore assumendo per questi una distribuzione normale.

Il concetto di pendio indefinito è valido nei casi in cui lo spessore del terreno al di sopra della superficie di scorrimento sia molto minore rispetto alla lunghezza del versante. Su ciascun elemento finito di versante si applica un modello di stabilità del tipo Mohr-Coulomb.

Il principale output di SINMAP è la cartografazione di regioni con $SI > 1$ se $FS_{min} > 1$; $0 < SI < 1$ se $FS = 0$; $SI=0$ se $FS_{max} < 1$.

In Figura 19, in cui si mettono in relazione la pendenza e l'area del drenaggio (*Specific Catchment Area*), si possono individuare sei campi con diverso valore di SI. Questo grafico è utile come ausilio nell'interpretazione dei dati e nella calibrazione dei parametri. Sono quattro le informazioni che si possono ricavare:

- La correlazione pendenza-area contribuente, per un campione di celle del territorio che non presentano instabilità;
- La correlazione pendenza-area contribuente, per le aree occupate dalle frane osservate;
- Le 5 linee che suddividono il piano in sei regioni a simile potenziale di umidità.

Inoltre in corrispondenza di ogni regione dell'area di studio, è possibile generare una statistica, che illustra la percentuale e la densità delle frane che cadono nelle diverse categorie dell'indice di stabilità.

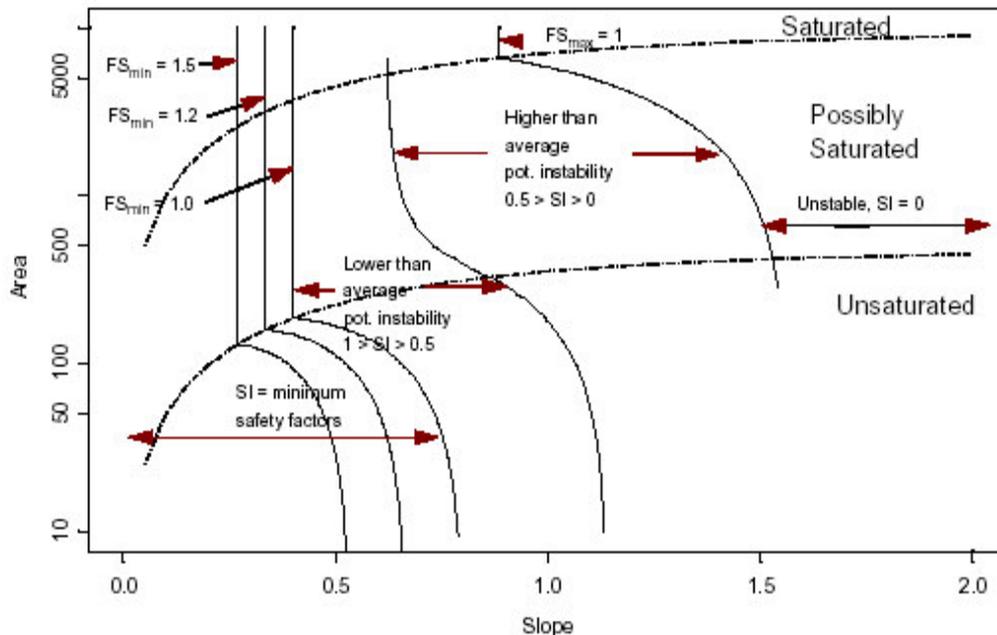


Figura 19 - Indice di stabilità definito in termini di pendenza-area di drenaggio (Pack et al., 1998).

E' possibile, quindi, costruire una tabella in cui si differenziano le classi di stabilità in funzione del valore assunto da SI (Tab.10).

Le classi individuate possono essere così interpretate:

- Stabile, Moderatamente Stabile e Quasi-Stabile: regioni nelle quali, in accordo con il modello, non dovrebbero verificarsi fenomeni di instabilità una volta assunti i parametri più conservativi nel *range* specificato.
- Instabile per Soglia inferiore o Soglia superiore: regioni per cui, in accordo con il *range* di incertezza dei parametri individuati nel modello, esiste una probabilità di rottura che è rispettivamente minore o maggiore del 50%. In queste regioni non sono richiesti fattori esterni per generare instabilità. L'instabilità si può manifestare semplicemente per una specifica combinazione dei valori assunti dai parametri all'interno del loro *range* di variazione.
- Instabile: regione in cui i versanti risultano instabili per qualsiasi valore assunto dai parametri nel *range* specificato.

CONDIZIONE	CLASSE	STATO DI STABILITA'	VARIABILITA' PARAMETRI	POSSIBILE INFLUENZA DI FATTORI NON CONSIDERATI
$SI > 1,5$	1	Zona stabile	La variabilità non influisce sulla instabilità	Sono richiesti significati fattori destabilizzanti per l'attività.
$1,5 > SI > 1,25$	2	Zona moderatamente stabile	La variabilità non influisce sulla instabilità	Sono richiesti moderati fattori destabilizzanti per l'instabilità
$1,25 > SI > 1$	3	Zona quasi stabile	La variabilità non influisce sulla instabilità	Anche lievi fattori destabilizzanti possono determinare l'instabilità
$1 > SI > 0,5$	4	Zona instabile per soglia inferiore	E' richiesta la metà peggiore del <i>range</i> dei parametri per la stabilità	Non sono necessari fattori destabilizzanti per l'instabilità
$0,5 > SI > 0$	5	Zona instabile per soglia superiore	E' richiesta la metà migliore del <i>range</i> dei parametri per la stabilità	Fattori stabilizzanti possono aiutare la stabilità
$0 > SI$	6	Zona instabile	La variabilità non influisce sulla stabilità	Fattori stabilizzanti sono richiesti per la stabilità

Tabella 10 - Determinazione delle sei classi di stabilità in relazione ai valori assunti da *SI* (da Pack et al., 1998).

Gli indici di stabilità che vengono prodotti dal modello non devono essere interpretati come numericamente precisi ma interpretati in termini di pericolosità relativa. Il risultato finale è strettamente dipendente dall'accuratezza dei dati DEM in ingresso e dall'accuratezza con cui sono posizionate le zone di innesco delle frane censite.

I dati di ingresso necessari per effettuare la simulazione con questo modello sono il DTM e una carta inventario dei fenomeni franosi. Gli altri dati richiesti per la simulazione sono la coesione, l'angolo di attrito interno, la trasmissività e la densità del suolo.

Prima di tutto l'area di studio, tramite l'utilizzo della carta litologica, viene suddivisa in regioni. In ognuna di esse vengono inseriti dei limiti (inferiore e superiore) per i valori di coesione e dell'angolo di attrito. Successivamente, nel

modello, viene inserita la carta inventario dei fenomeni franosi. Questo modello, a differenza di altri, permette di distinguere le diverse tipologie di frana che insistono sul territorio analizzato.

Per il calcolo dell'indice di stabilità, la prima operazione è quella di correggere i dati topografici tramite "*pit filled DEM*", funzione che permette di eliminare quelle imperfezioni del modello digitale che potrebbero impedire di giungere a convergenza. Queste imperfezioni infatti sono degli avvallamenti, circondati da terreni con elevazione maggiore, che non riescono a drenare acqua. Il passo successivo, nel calcolo dell'indice di stabilità, è il calcolo della pendenza e della direzione di flusso. Per il calcolo di queste due carte il programma utilizza il metodo a direzioni di scorrimento multiple, sviluppato da Tarboton (1997). La pendenza e la direzione di scorrimento associate con la cella della griglia sono scelte come la magnitudo e la direzione del vettore lungo il pendio più scosceso tra le otto che la affiancano. Questo viene implementato utilizzando le equazioni date da Tarboton (1997), nel caso in cui però la direzione di scorrimento viene calcolata in aree pianeggianti si utilizza il metodo di Gabrecht & Martz (1997). Infine viene calcolata l'area contribuyente. A questo punto, grazie anche alla carta di saturazione generata da SINMAP, può essere calcolato l'indice di stabilità dell'area esaminata. Durante l'analisi di stabilità, SINMAP produce, oltre alla carta di saturazione e a quella dell'indice di stabilità, un grafico che mostra la correlazione tra la pendenza e l'area contribuyente, per ogni regione in cui questa è stata precedentemente suddivisa.

SHALSTAB

SHALSTAB, acronimo di SHALLOW Landslide STABILITY, anch'esso sviluppato su piattaforma GIS, è un modello fisicamente basato, sviluppato da Montgomery e Dietrich (1994) per la valutazione della pericolosità per frane superficiali a scala di bacino.

Questo modello mette in relazione la topografia (pendenza e area di drenaggio) con i parametri geotecnici del terreno (densità, angolo di attrito, coesione) e quelli idrogeologici (precipitazione, infiltrazione, trasmissività/conducibilità idraulica).

Il modello SHALSTAB combina un modulo tradizionale di calcolo della stabilità dei pendii, ("pendio indefinito") con un modulo per la stima della superficie piezometrica all'interno dello strato superficiale di terreno sovrastante il substrato,

in condizioni di idrologia allo stato stazionario (ovvero di raggiunto equilibrio fra afflussi e deflussi).

L'apporto idrologico viene calcolato utilizzando un modello che schematizza il deflusso ipodermico e superficiale allo stato stazionario (O'Loughlin, 1986).

Nella Figura 20 (parte bassa) la superficie del terreno è indicata con il tratto in grassetto mentre l'area grigia rappresenta la somma dei deflussi ipodermico, in condizioni sature, e superficiale per saturazione con una portata uguale rispettivamente a TMb e udb .

M è la componente della pendenza espressa come $\sin\theta$, q è la differenza tra la precipitazione p e l'evapotraspirazione e , r la profondità del drenaggio (m), a l'area di drenaggio (m^2), b la larghezza della cella (m), h lo spessore del terreno saturo (m) e z lo spessore del suolo (m), (h e z sono misurati verticalmente).

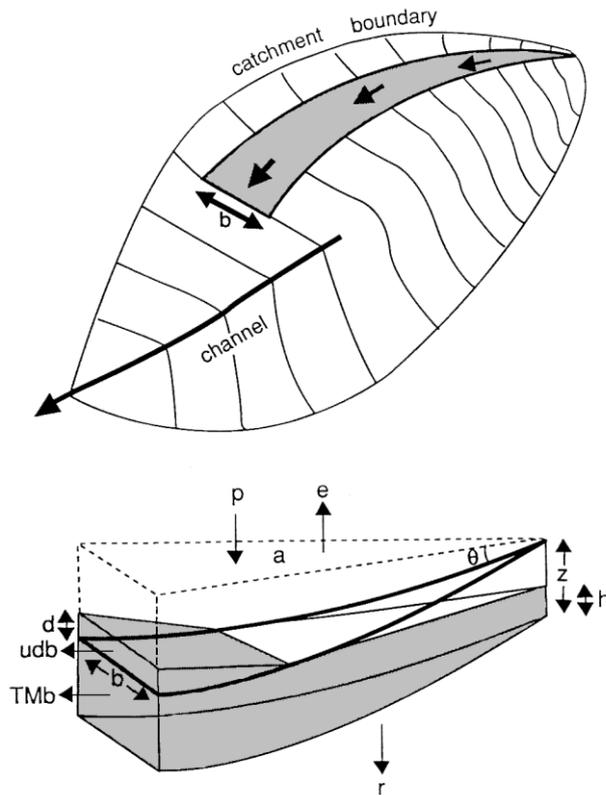


Figura 20 - Rappresentazione di un filetto di flusso elementare in un sottobacino idrografico utilizzato per discretizzare il calcolo del bilancio idrologico.

In assenza di drenaggio profondo e di afflusso di acqua dal substrato, la definizione di stato stazionario implica che il prodotto di q per l'area di drenaggio a monte della sezione indicata risulti uguale al deflusso che attraversa la cella di larghezza b . Utilizzando la legge di *Darcy* ciò può venire espresso come:

$$qa = ksh\cos\theta\sin\theta b \quad (1)$$

in cui $\sin\theta$ è il gradiente idraulico. Raggiunta la saturazione il deflusso ipodermico eguaglierà il prodotto tra la trasmissività T , il gradiente idraulico $\sin\theta$ e b .

$$Tb\sin\theta = kscos\theta\sin\theta b \quad (2)$$

Combinando la (1) e la (2) si ottiene:

$$h/z = q/T(a/b\sin\theta) \quad (3)$$

Secondo l'equazione (3) h/z è determinato dal prodotto di un rapporto idrologico, (q/T) moltiplicato per un rapporto topografico $(a/b\sin\theta)$. Il rapporto idrologico (q/T) esprime l'intensità della precipitazione rispetto alla capacità del terreno di drenare acqua verso valle (trasmissività).

Maggiore è q rispetto a T , più facilmente il suolo raggiungerà condizioni di saturazione. Il rapporto topografico $a/b\sin\theta$ esprime gli effetti della topografia sul deflusso. Gli effetti della convergenza topografica sulla concentrazione del deflusso e sull'aumento delle pressioni interstiziali sono esplicitati nel rapporto a/b .

Secondo questa relazione maggiore è l'area di drenaggio relativamente alla larghezza della cella, maggiore è il rapporto h/z . Aumentando la pendenza, il deflusso diventa più veloce, la capacità drenante aumenta e conseguentemente diminuisce il livello di saturazione definito dal rapporto h/z .

Il modello meccanico utilizzato in SHALSTAB si basa sulla teoria del pendio infinito (Skempton & Delory, 1957). Secondo questo modello lo scivolamento avviene su una superficie predefinita sub-parallela alla superficie topografica; la superficie piezometrica viene a sua volta ipotizzata sub-parallela alla superficie di scorrimento (Fig.21). Queste assunzioni sono considerate ragionevoli per lo studio dei dissesti superficiali, in cui gli spessori di terreno coinvolti nell'analisi sono modesti e laddove si possa individuare una netta superficie di discontinuità fra coltre superficiale e substrato.

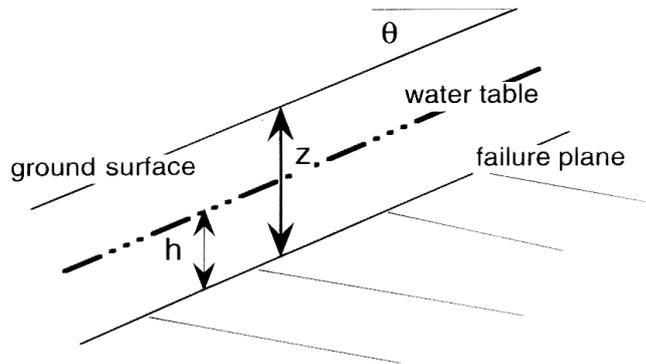


Figura 21 - Approssimazione unidimensionale usata nel modello di stabilità. θ è la pendenza, h l'altezza della tavola d'acqua e z lo spessore del concio.

Il criterio di rottura utilizzato nel modello del pendio infinito è quello di Mohr-Coulomb:

$$\tau = C + (\sigma - u) \tan \Phi \quad (4)$$

in cui:

τ = resistenza al taglio del materiale (N/m^2);

C = coesione del terreno (N/m^2);

$\sigma - u$ = sforzo normale efficace (N/m^2);

Φ = angolo di attrito interno (gradi).

Uguagliando la (4) alla componente tangenziale del peso del concio ($\rho s g z \cos \theta \sin \theta$) e assumendo una coesione nulla, si ottiene:

$$\rho s g z \cos \theta \sin \theta = (\rho s g z \cos 2\theta - \rho w g h \cos 2\theta) \tan \Phi \quad (5)$$

in cui z è lo spessore del concio, h è l'altezza della colonna d'acqua sopra il piano di scivolamento, ρs e ρw sono la densità del suolo e dell'acqua e g è l'accelerazione gravitazionale. L'equazione (5) può essere esplicitata in funzione del rapporto h/z che rappresenta la frazione della colonna di suolo satura alla rottura:

$$h/z = \rho s / \rho w (1 - \tan \theta / \tan \Phi) \quad (6)$$

Assumendo paralleli alla superficie del terreno sia il piano di scivolamento sia il deflusso all'interno del suolo, il rapporto h/z può solo essere minore o uguale a 1.0.

Nella relazione mostrata in Figura 22 vengono definiti 4 campi di stabilità. Qualsiasi pendenza uguale o maggiore dell'angolo di attrito annulla la parte destra della (6). Il sito quindi diventa instabile anche se completamente secco

($h/z=0$). Questo campo viene chiamato incondizionatamente instabile e corrisponde, in buona approssimazione, alle zone in cui affiora il substrato. h/z non può assumere valori maggiori di 1 e se $\tan\theta$ è minore o uguale a $\tan\Phi[1-(\rho_s/\rho_w)]$ allora il sito è incondizionatamente stabile.

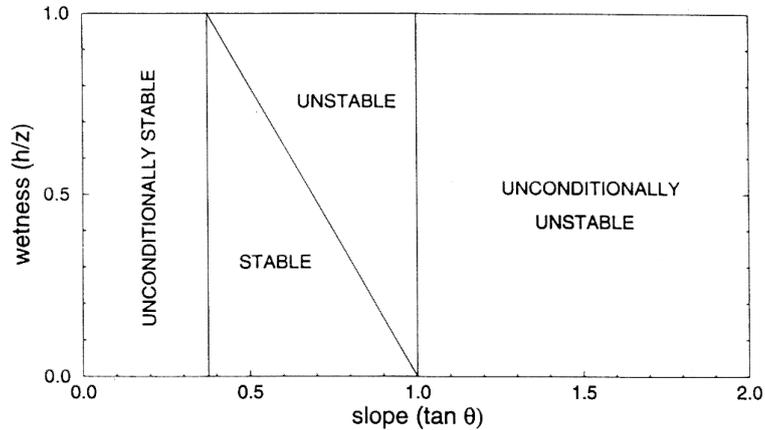


Figura 22 - Relazione tra h/z e $\tan\theta$ per un angolo di attrito di 45° e un rapporto ρ_s/ρ_w di 1.6

È stato osservato sul campo che questo tipo di ambienti possono sperimentare il deflusso superficiale per saturazione senza generare fenomeni di dissesto. Nel campo intermedio tra la stabilità e l'instabilità incondizionata la rottura del materiale è condizionata dalla fluttuazione della tavola d'acqua (campo stabile/instabile).

Accoppiando il modello idrologico (3) e quello di stabilità (6) del pendio sopra descritti si ottiene l'equazione alla base del modello SHALSTAB (Dietrich et al., 1992; Dietrich et al., 1993; Montgomery & Dietrich, 1994) che, in funzione del rapporto h/z , può essere espressa come:

$$q/T = \rho_s/\rho_w (1 - \tan\theta/\tan\Phi) b/a \sin\theta \quad (7)$$

I campi di stabilità alla base del modello SHALSTAB sono riportati in Tabella 11

CAMPO DI STABILITA'	CONDIZIONI
Incondizionatamente stabile, saturo	$\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$; $a/b > (T/q)\sin\theta$
Incondizionatamente stabile, non saturo	$\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$; $a/b < (T/q)\sin\theta$
Instabile, saturo	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{q} \sin\theta$; $a/b > (T/q)\sin\theta$; $\tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
Instabile, non saturo	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{q} \sin\theta$; $a/b < (T/q)\sin\theta$; $\tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
stabile, non saturo	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{q} \sin\theta$; ; $a/b < (T/q)\sin\theta$; $\tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
Incondizionatamente instabile, saturo	$\tan\phi > \tan\theta$; $a/b > (T/q)\sin\theta$
Incondizionatamente instabile, non saturo	$\tan\phi > \tan\theta$; $a/b < (T/q)\sin\theta$

Tabella 11 - Campi di stabilità e rispettive condizioni per il modello SHALSTAB.

B) Metodi agli elementi finiti

I metodi fin qui esaminati sono classificati come “metodi all’equilibrio limite” poiché studiano l’equilibrio di un corpo rigido, rappresentato dalla massa di terreno che scivola. Da tale equilibrio viene calcolata la resistenza mobilitata da confrontare con la resistenza disponibile, determinata secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Il metodo agli elementi finiti considera il terreno come un

continuo, modellato attraverso una serie di elementi discreti. Nel caso di analisi lineare, l'equilibrio della struttura di elementi discreti è retto da un sistema di equazioni di tipo lineare nella forma matriciale:

$$f = K \times u$$

in cui f è il vettore dei carichi applicati ai nodi, K è un operatore lineare detto matrice di rigidezza della struttura e u è il vettore degli spostamenti nodali che rappresentano le incognite del problema.

È possibile determinare gli spostamenti nodali dai quali in seguito ricava le deformazioni e le tensioni negli elementi. L'analisi è condotta in stato piano di deformazione.

Nota lo stato tensionale nell'intero pendio vengono determinate le tensioni normali (σ) e tangenziali (τ) alla superficie di scivolamento ipotizzata. Il fattore di sicurezza (F_s) è definito come il rapporto tra la resistenza al taglio disponibile e la resistenza al taglio mobilitata, come indicato dalla seguente espressione:

$$F_s = \frac{\int (c + (\sigma - \mu) \times tg\phi) \times dL}{\int \tau \times dL}$$

nella quale l'integrazione è estesa all'intera lunghezza della superficie di rottura.

Nel caso di analisi agli elementi finiti di tipo non lineare vengono modellati, in prossimità della discontinuità individuata dalla superficie di scorrimento, gli elementi finiti di tipo giunto. Questi sono in grado di reagire allo scorrimento fino al valore imposto dalla resistenza a taglio disponibile in base al tipo di terreno in cui si trovano. Per ogni caratteristica di sforzo il legame costitutivo è di tipo elasto plastico.

Qualora lo sforzo calcolato dal solutore superi la resistenza a taglio disponibile, l'elemento giunto entra in plasticità. Nel caso in cui tutti gli elementi giunto entrino in plasticità è possibile l'incorrere di una labilità con conseguente impossibilità di calcolare una soluzione. Al termine dell'analisi non lineare è noto lo stato tensionale nell'intero pendio e principalmente negli elementi giunto. Il coefficiente di sicurezza è ricavato dal rapporto tra la resistenza a taglio disponibile nel giunto ($c + N \times tg\phi$) e quella mobilitata nel giunto (T).

$$F = \sum_i^n \frac{c_i \times L_i + (N_i - u_i) \times tg\phi_i}{T_i}$$

dove la sommatoria è estesa al numero n di elementi giunto e per ogni giunto si ha:

c = coesione;

L = lunghezza del giunto;

N = sforzo normale agente;

u = sottospinta dell'acqua agente;

φ = angolo d'attrito interno;

T = sforzo di taglio agente.

Metodologie utilizzate per l'analisi di stabilità di una parete rocciosa

- Indice SMR (Slope Mass Rating)

Una valutazione delle caratteristiche di stabilità, o di pericolosità di un ammasso roccioso più o meno fratturato, può essere effettuata incrociando l'indice RMR (*Rock Mass Rating*), proposto da Bieniawski (1979), che da un'indicazione assoluta delle condizioni geo-meccaniche degli ammassi rocciosi indipendentemente dal contesto geomorfologico regionale, e gli ammassi rocciosi stessi, considerando i rapporti giacitureali tra versante roccioso e sistemi di giunti, che determina invece la maggiore o minore propensione dell'ammasso a subire un potenziale collasso strutturale lungo i sistemi di giunti.

Questo metodo è stato proposto da Romana (1985) introducendo l'indice SMR (*Slope Mass Rating*) che corregge l'indice RMR di Bieniawski con l'introduzione di 4 fattori correttivi che tengono conto dei rapporti giacitureali tra giunti e parete rocciosa più o meno sfavorevoli alle condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso:

$$SMR=RMR+(F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Per calcolare il valore del *SMR*, occorre calcolare prima di tutto il valore dei coefficienti introdotti da Romana (1995) e di seguito elencati.

F_1 - Questo fattore riflette le condizioni di parallelismo fra la parete e le discontinuità; il suo valore varia da un minimo di 0.15, quando l'angolo tra la parete e le discontinuità è maggiore di 30°, ad un massimo di 1 quando l'angolo è <5°.

F_2 - Questo fattore è calcolato solo per lo scivolamento planare, poiché per il ribaltamento è supposto sempre uguale a 1; il suo valore è minimo quando l'inclinazione del sistema di discontinuità è minore di 20°, ed è massimo quando è maggiore di 45°.

F₃ - Questo parametro tiene conto sia dell'inclinazione del versante che dell'inclinazione del sistema di discontinuità considerato.

Oltre questi fattori, Romana (1995) introduce un quarto fattore F₄ empirico, in base all'origine e alla tipologia della parete variabile da 0 nel caso di parte artificiale prodotta con l'impiego di esplosivi a 15 nel caso di parete naturale.

I parametri correttivi del RMR introdotti da Romana (1995) sono presentati nella Tabella 12.

Il calcolo del SMR introduce una distinzione nella valutazione dell'indice di pericolosità di un ammasso roccioso, anche per quanto riguarda la tipologia dell'evento franoso preso in considerazione; infatti l'analisi considera le due principali fenomenologie di eventi di crollo possibili nelle pareti in roccia, le frane di scivolamento planare dei blocchi di roccia (P, *Plane*) e quelle di ribaltamento (T, *Toppling*), calcolando diversamente il valore del SMR per ognuna delle due.

Caso		Molto favorevole	Favorevole	Normale	Sfavorevole	Molto sfavorevole
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	F1	0.15	0.40	0.7	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	F2	0.15	0.40	0.7	0.85	1.00
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<-10°
T	$\beta_j + \beta_s$	<110°	110°-120°	>120°	--	--
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60
α_j = Direzione immersione delle discontinuità		α_s = Direzione immersione del versante		β_j = Inclinazione delle discontinuità		β_s = Inclinazione del versante

Tabella 12 - Fattori correttivi per il calcolo del SMR.

- ROTOMAP

ROTOMAP è un *software* nato per l'analisi dei pendii in cui possono verificarsi problemi di distacco in quota e successivo rotolamento a valle di blocchi di roccia, nonché per la progettazione delle opere di protezione. Il metodo utilizza un approccio di tipo statistico che consente di determinare le aree di probabilità di arresto dei blocchi e la distribuzione delle energie cinetiche.

Particolare importanza riveste la fase di ricostruzione del modello numerico del pendio, che potrà essere calcolato a partire da una distribuzione arbitraria di punti (X,Y,Z) trasformate dal programma in una griglia regolare.

La ricostruzione della topografia dell'area di studio avviene attraverso due fasi di lavoro: creazione di una griglia regolare a partire da una serie di punti sparsi; ricostruzione delle curve a partire dalla griglia regolare.

La griglia generata è a maglie quadrate, l'area di ognuna delle maglie del reticolo rappresenta una zona ove sono costanti l'inclinazione ed i parametri fisici utilizzati dal modello. Per tale motivo la dimensione delle maglie deve risultare grande rispetto alla dimensione media dei blocchi, ma piccola rispetto all'estensione dell'area in esame.

I metodi di calcolo proposti dal programma per la costruzione della griglia regolare sono:

- la Media Pesata
- il *Kriging*
- il Metodo della Superficie Polinomiale Limite

I passaggi, che precedono l'elaborazione dei percorsi di caduta massi, sono: l'assegnazione dei parametri fisici richiesti dal programma, dei quali si dirà nel prossimo paragrafo, e l'assegnazione dei punti di distacco da cui far partire le traiettorie. Una volta terminato il calcolo dei percorsi dei blocchi, possono essere calcolate: le curve di isofrequenza dei punti di arrivo; le curve isoenergetiche, ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica media e massima; le altezze massime dei rimbalzi. Infine, inserendo reti o valli paramassi, possono essere effettuate analisi dedicate alla definizione dell'intervento di protezione al fine di determinare quello che offre il miglior rapporto tra la protezione offerta ed il costo dell'intervento stesso.

Il tipo di problema in oggetto è evidentemente molto complesso in quanto il comportamento reale dei blocchi nel corso del rotolamento dipende da una infinità di parametri di tipo sia geometrico che fisico. Le leggi che regolano il rapporto tra i parametri geomorfologici ed i percorsi dei blocchi non sono lineari

ma caotiche, nel senso che non esiste proporzionalità tra le variazioni dei dati di ingresso e le variazioni nei percorsi che ne derivano, in quanto variazioni anche molto piccole nelle condizioni iniziali provocano, di norma, grandi (e quindi imprevedibili) variazioni nelle condizioni finali. Ne deriva quindi che l'unica soluzione possibile consista nell'utilizzo di un approccio di tipo statistico. In tal modo non sono determinati i punti di arrivo dei blocchi ma le aree di probabilità in cui i blocchi si arrestano.

I parametri fisici utilizzati dal modello sono i coefficienti di restituzione normale e tangenziale, il coefficiente di attrito al roto-scivolamento e l'angolo limite. I coefficienti di restituzione sono definiti dai rapporti tra energie post e pre-impatto; il coefficiente d'attrito di roto-scivolamento è riferito ad un blocco che rotola perdendo temporaneamente contatto con il pendio; l'angolo limite definisce il passaggio dalle condizioni di moto aereo a quelle di roto-scivolamento.

Il programma valuta il comportamento medio, determinato attraverso la simulazione di un grande numero di caduta di blocchi, ciascuno dei quali possa fornire l'informazione relativa ad un percorso medio e più probabile tra tutti quelli fisicamente ammissibili, rinunciando ad effettuare previsioni di tipo deterministico.

- Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP)

Il programma CRSP (*Colorado Rockfall Simulation Program*) messo a punto da Pfeiffer & Bowen nel 1989, è un modello numerico di tipo stocastico che simula il comportamento delle frane in roccia. È stato elaborato con lo scopo di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento. E' stato utilizzato allo scopo di analizzare le traiettorie di caduta dei massi ed è in grado di fornire analisi statistiche della velocità, dell'energia cinetica e dell'altezza dei rimbalzi in diversi punti della scarpata.

Per descrivere il movimento del masso lungo un versante, il modello applica l'equazione del moto parabolico di un corpo ed il principio di conservazione dell'energia totale. Sono utilizzate funzioni derivate empiricamente relative alla velocità, all'attrito ed alle proprietà del materiale costituente il versante per analizzare l'interazione dinamica fra il masso ed il pendio.

I parametri fisici richiesti dal programma per modellare il fenomeno di impatto sono: coefficienti di restituzione normale e tangenziale al pendio, rugosità del versante e dimensione dei blocchi.

Le ipotesi alla base dell'algoritmo di calcolo sono:

- tutti i calcoli vengono sviluppati in forma bidimensionale;
- il programma è in grado di tenere conto della dimensione e della forma del masso: quest'ultima può essere impostata come sferica, cilindrica o discoidale;
- il versante oggetto di analisi è simulato mediante la sua scomposizione in segmenti rettilinei (celle) con propria lunghezza ed inclinazione e ad ogni cella sono assegnate, in funzione della morfologia del terreno formante la cella stessa, le proprietà che influenzano la dinamica del masso che rimbalza sul versante: il coefficiente normale di restituzione (R_n), il quale misura il grado di elasticità in una collisione, in direzione normale alla cella;
- il coefficiente tangenziale di restituzione (R_t), il quale misura la resistenza per attrito al movimento, in direzione parallela al versante; assume che il masso non si frantumi all'impatto durante la caduta, mantenendo quindi costanti forma e dimensione, che influenzano in modo sostanziale la ripartizione dell'energia di traslazione e di rotazione attraverso il momento d'inerzia, e simulando così il caso peggiore;
- la variazione statistica osservata nella realtà delle cadute massi aventi origine da una stessa fonte è configurata variando casualmente l'angolo a cui avviene l'impatto tra un masso ed il pendio, entro limiti stabiliti dalla dimensione del masso e da un coefficiente di rugosità proprio della cella, funzione anch'esso della morfologia, che simula l'interazione delle irregolarità della superficie del terreno con il masso; la tipologia del rimbalzo è sostanzialmente determinata proprio da tale angolo di impatto (Wu, 1984).

La simulazione della caduta massi inizia entro una zona verticale, o zona di alimentazione, che rappresenta il punto, o i punti, di partenza del blocco; è necessario inoltre assegnare le componenti iniziali di velocità orizzontale e verticale.

Il blocco è soggetto al movimento di caduta libera finché non collide con la superficie del pendio, cioè finché la sua traiettoria non interseca la poligonale che descrive il profilo del pendio.

Ad ogni punto di intersezione, nota la velocità pre-impatto, l'angolo α che la traiettoria forma con il pendio e la velocità di rotazione, sono calcolate la velocità post-impatto, orizzontale e verticale, e la nuova velocità di rotazione.

Al punto d'impatto, l'angolo di inclinazione del pendio φ è fatto variare con tecnica *random* entro un campo di valori compresi tra 0 e θ_{max} .

Tale angolo massimo è calcolato in funzione della rugosità della superficie (definita come la variazione perpendicolare del pendio entro una distanza del pendio uguale al raggio del masso) e della dimensione del masso utilizzando la seguente equazione:

$$\theta_{max} = \tan^{-1} (S/R)$$

dove:

S = rugosità della superficie;

R = raggio del blocco.

L'angolo di impatto α è utilizzato per scomporre la velocità d'ingresso (V_1) in componenti di velocità tangenziale ($V_{t1} = V_1 \cos \alpha$) e normale ($V_{n1} = V_1 \sin \alpha$) rispetto alla superficie del pendio. Il nuovo valore di velocità tangenziale in ogni punto di intersezione tra percorso del masso e pendio è calcolato utilizzando il teorema di conservazione dell'energia:

$$(\frac{1}{2} I \omega_1^2 + \frac{1}{2} M V_{t1}^2) f(F) SF = \frac{1}{2} I \omega_2^2 + \frac{1}{2} M V_{t2}^2$$

dove:

M = massa del masso;

I = momento d'inerzia del masso;

I = $2MR^2/5$ (masso sferico);

I = $MR^2/2$ (masso discoidale);

I = $MR^2/4 + ML^2/12$ (masso cilindrico; L = lunghezza);

ω = velocità iniziale di rotazione;

ω_2 = velocità finale di rotazione;

V_{t1} = velocità tangenziale iniziale;

V_{t2} = velocità tangenziale finale;

$f(F)$ = Funzione d'attrito = $R_t + [(1-R_t)/[(V_{t1} - \omega_1 R)^2/20] + 1.2]$;

SF = Fattore di scala = $R_t / [V_{n1} / (250 R_n)]^2 + 1$.

In qualsiasi collisione non perfettamente elastica, un'aliquota dell'energia cinetica è perduta. All'impatto fra un masso e il pendio, la componente di energia cinetica parallela rispetto al pendio e l'energia di rotazione sono attenuate dall'attrito e da collisioni con elementi perpendicolari al pendio. L'attrito è una funzione del materiale costituente il versante, determinata sia dal coefficiente tangenziale sia dall'eventualità che il masso stia inizialmente rotolando o scivolando lungo la superficie. La velocità normale al pendio riveste anch'essa un

ruolo fondamentale sulla perdita di energia cinetica tangenziale al pendio. Un aumento della velocità normale rispetto alla superficie dà come risultato una forza normale maggiore durante l'impatto.

Il fattore di scala: permette una correzione per le aumentate resistenze di attrito dovute ad un aumento della forza normale. L'equazione su riportata può essere risolta al fine di ricavare nuove velocità tangenziali e di rotazione, imponendo la seguente relazione tra velocità di rotazione e velocità tangenziale:

$$V_{t2} = \omega 2R$$

Questa equazione descrive la situazione in cui il masso rotola, anziché scivolare, lungo la superficie durante l'impatto. I termini $f(F)$ e SF sono ricavabili attraverso espressioni empiriche che vengono utilizzate per valutare l'energia cinetica dissipata nelle collisioni tra blocco e pendio a causa dell'attrito e dell'urto. L'attrito riguarda principalmente la dissipazione dell'energia prodotta dalla velocità tangenziale, l'urto quella prodotta dalla velocità normale al pendio.

Attraverso passaggi di calcolo si ottiene l'espressione della velocità tangenziale in uscita:

$$V_{t2} = \sqrt{[R^2 (I\omega^2 + MV^2) f(F) SF] / (I + MR^2)}$$

mentre la nuova velocità normale è data dalla:

$$V_{n2} = V_{n1} R_n / 1 + (V_{n1}/30)^2$$

Questa equazione utilizza il coefficiente di restituzione (R_n) ed un fattore di scala funzione della velocità $[1/(1+V_{n1}/30)]$ per determinare la nuova velocità normale (V_{n1}). Tale fattore di scala impone una correzione per la diminuzione del coefficiente normale di restituzione man mano che la velocità di impatto aumenta.

E' stato verificato anche sperimentalmente che si ha una transizione da un rimbalzo più elastico a basse velocità verso un rimbalzo molto meno elastico, causato dall'accresciuta frantumazione del masso e dalla formazione di impronte sul pendio, a velocità di impatto più elevate (Habib, 1977).

Dopo ogni rimbalzo il programma esegue un'iterazione per trovare il lasso di tempo trascorso fino al rimbalzo successivo. Noto il tempo, è possibile calcolare la posizione del punto di impatto successivo: se la distanza percorsa dal masso tra un rimbalzo e il successivo è inferiore al suo raggio, si considera che il masso

stia rotolando e gli viene data una nuova posizione x , y uguale ad una distanza di un raggio rispetto alla sua posizione precedente.

Questo procedimento consente di configurare un masso che rotola sotto forma di una serie di brevi rimbalzi, in maniera simile al modo in cui un masso irregolare rotola su di una superficie irregolare.

> 1.1.3.1.5 Previsione temporale (Definizione dei tempi di ritorno)

La previsione temporale degli eventi franosi consiste essenzialmente nella definizione della loro probabilità di accadimento e fornisce, quindi, una pericolosità assoluta. Solitamente per fornire tale informazione servono dati sulla frequenza dei movimenti gravitativi, che possono essere ottenuti dall'analisi delle serie temporali degli eventi, tramite archivi storici e dall'esame di foto aeree di anni differenti. Questo tipo di dati, oltre ad essere frammentari e disomogenei, è oneroso sia da un punto di vista economico sia per il tempo necessario alla raccolta. Inoltre c'è da considerare che, ogni volta che si innesca una frana, cambiano le condizioni morfologiche, geomeccaniche ed idrogeologiche del versante, e si creano nuove condizioni di instabilità, diverse da quelle iniziali. Questi cambiamenti permettono al geomorfologo di riconoscere la frana e capire meccanismi e cause del movimento, ma limitano la capacità di prevederne future riattivazioni. Anche l'analisi delle serie temporali dei fattori di innesco può essere molto utile nel determinare la frequenza delle frane in una certa area, in quanto, solitamente, le notizie su eventi meteorici o terremoti sono più complete rispetto a quelle sulle frane. Se consideriamo, ad esempio, il caso di frane attivate da determinati eventi meteorici, è possibile stabilire, sulla base dei dati di pioggia e delle frane verificatesi nel passato, delle soglie per le quali si ha la probabilità di innesco di un movimento gravitativo, in determinate condizioni geologiche e topografiche (Glade et al., 2005).

La probabilità di occorrenza può essere definita sia in termini assoluti (tempi di ritorno) o secondo scale nominali (es. molto probabile, poco probabile, ecc.), ma resta problematico valutare il grado di pericolosità.

Se si definisce Pr come la probabilità di occorrenza annua di un evento franoso, il tempo di ritorno T dell'evento è dato da $1/P$. La probabilità di occorrenza di una frana in un certo periodo t di riferimento è data dall'espressione:

$$Pr = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

Del Prete et al. (1992), sulla base delle evidenze di terreno della stabilità dei versanti hanno proposto un metodo per l'interpretazione della ricorrenza delle riattivazioni di frane a cinematica lenta mentre, una seconda proposta a carattere generale, è avanzata da Fell (1994).

La differenza tra le due proposte, come suggeriscono le classi di pericolosità di un evento con tempi di ritorno di 50 anni, vanno ascritte alle differenti finalità e alla diversa metodologia per la valutazione della pericolosità. Fell (1994) ha proposto un metodo da impiegare in diverse situazioni geologiche e per diversi tipi di frana (Tab.13); inoltre la pericolosità è calcolata dal prodotto del valore di probabilità per il volume della massa franata (intensità). Per Del Prete et al. (1992), che hanno considerato frane a cinematica lenta, il valore di probabilità è utilizzato direttamente per quantificare la pericolosità (Tab.14);

Pericolosità	T (anni)	P (annuale)
Estremamente elevata	1	1
Molto elevata	5	0.2
Elevata	20	0.05
Media	100	0.01
Bassa	1000	0.001
Molto bassa	10000	0.0001

Tabella 13 - Scala di pericolosità delle frane in base al tempo di ritorno (Fell, 1994).

Classe	Pericolosità	T (anni)	Tipo di frana
1	Molto elevata	> 2	Continua o stagionale
2	Elevata	2-5	Intermittente
3	Media	5-20	Intermittente
4	Bassa	20-50	Intermittente
5	Molto bassa	>50	Intermittente

*Tabella 14 - Classi di pericolosità di frana in base al tempo di ritorno
(Del Prete et al., 1992).*

Per la valutazione dei tempi di ritorno di un evento sono comunemente usati, come sopra brevemente accennato, i seguenti approcci:

- approcci geomorfologici o analisi qualitative;
- analisi di serie temporali relative agli effetti;
- analisi di serie temporali relative alle cause (correlazione tra frane ed cause innescanti come le precipitazioni) per i quali si disponga di misure sistematiche nel tempo, permette la stima dei tempi di ritorno dei movimenti
- monitoraggio attraverso l'osservazione strumentale (estensimetri, inclinometri, piezometri, geofoni, ecc.) delle deformazioni per prevederne i movimenti mediante il confronto con soglie o modelli predefiniti.

Criteri geomorfologici o analisi qualitative

La ricorrenza dei fenomeni franosi può essere stimata soggettivamente in base ai caratteri geomorfologici e alle informazioni di carattere storico in una data zona. L'analisi di tipo geomorfologico e/o geotecnico, in mancanza di dati storici sulle frane, può fornire comunque una stima della probabilità dei tempi di ritorno. Ad esempio, si può assegnare una probabilità più bassa ad aree che mostrano scarpate di frana degradate, a basso angolo e vegetate rispetto ad aree in cui affiorano scarpate non degradate, ad elevata pendenza e con terreni affioranti.

Analisi di serie temporali relative agli effetti

È basata sull'analisi storica dei movimenti franosi e costituisce la fonte di informazione principale per la stima dei tempi di ritorno degli eventi di frana, potendone datare, ad esempio, esattamente l'attivazione e/o riattivazione della frana. L'assunto di base di questo metodo è che la distribuzione dei fenomeni franosi non sia casuale.

Hutchinson (1988) sostiene che i tempi di ritorno non sono valutabili per frane di prima generazione a causa delle condizioni dei materiali prossime ai valori della resistenza di picco, mentre le riattivazioni si collocano in intervalli prossimi a quelli residui; pertanto, le frane di neo-formazione forniscono scarse indicazioni sul comportamento delle riattivazioni. Va sottolineato, inoltre, che l'occorrenza di un fenomeno di frana può determinare forti modificazioni nell'assetto topografico, geologico ed idrologico, dando luogo a differenti condizioni di instabilità che limitano fortemente la capacità di prevederne le condizioni di riattivazione.

Gli strumenti a disposizione per la raccolta dei dati dipendono ovviamente dall'età della frana e dalla frequenza delle riattivazioni; per eventi recenti le principali fonti, in un ipotetico ordine di importanza, sono:

- analisi multi temporale di supporti cartografici, foto aeree o immagini satellitari;
- pubblicazioni scientifiche
- relazioni tecniche
- quotidiani locali, riviste, notiziari e, infine, testimonianze orali.

Per eventi più antichi è possibile trarre qualche informazione dall'esame di carte e documenti storici mentre, per eventi con tempo di ritorno molto lungo, è possibile utilizzare metodi di datazione quali il metodo del radiocarbonio, la lichenometria e la dendrocronologia (Starkel, 1966; Schoeneich, 1991; Corominas et al., 1994).

La frequenza annua $f(N)$ delle frane in un periodo di N anni, è data dal rapporto fra il numero di eventi n ed il numero N di anni considerati. Se N è sufficientemente lungo, $f(N)$ costituisce una stima della probabilità di occorrenza annua P e può essere calcolata la pericolosità come segue:

$$H(N) = 1 - (1 - P)^N = 1 - (1 - 1/T)^N$$

Tale tipo di analisi è particolarmente agevole nel caso di eventi ben visibili e ripetibili come nel caso di frane lente e/o intermittenti (di riattivazione periodica) per le quali è possibile ricostruire, da documenti e/o testimonianze, una serie storica sufficientemente lunga (Del Prete et al., 1992).

Il metodo proposto da Hutchinson & Chandler (1991) si basa sull'integrazione di dati storici, geologici, geomorfologici e dati relativi a monitoraggi topografici.

I dati storici possono essere integrati con i dati temporali derivati dalla dendrocronologia ed altre tecniche di datazione applicate alla scala del fenomeno (Stout, 1977; DeGraff & Agard, 1984; Trustrum & De Rose, 1988; Margottini & Fantucci, 1993).

Infine, l'analisi storica per la sua soggettività, la qualità dell'informazione, la scarsa risoluzione e precisione dell'informazione spaziale (per singoli fenomeni e per vaste aree) rende talora dubitativa la sua utilità ed affidabilità per la valutazione dei tempi di ritorno (Guzzetti et al., 1994; Ibsen & Brunnsden, 1996). Ciononostante essa ha spesso fornito risultati incoraggianti (Guzzetti et al., 1994; Ibsen & Brunnsden, 1996; Cruden, 1997; Evans, 1997; Glade, 1998).

Analisi di serie temporali relative alle cause

Quando non sia possibile fare una stima diretta dei tempi di ritorno, si può fare ricorso all'analisi dei dati di altri fenomeni naturali che sono, in qualche modo, correlabili all'innescò di movimenti franosi.

Le cause innescanti più comuni sono riconducibili alle precipitazioni, all'attività antropica e, in subordine, alla sismicità e ai fenomeni di erosione.

In linea teorica la probabilità di una frana è data dalla somma delle probabilità delle diverse cause d'innescò (Fell, 1994):

$$P = P_r + P_a + P_s + P_e$$

Dove le quantità al secondo membro sono rispettivamente la probabilità di innescò per precipitazioni, attività antropica, eventi sismici ed erosione (Canuti & Casagli, 1996).

L'erosione costituisce un fattore innescante solo in particolari condizioni (sponde fluviali o litorali marini) ma anche lo sviluppo di forme di erosione lineare (solchi di erosione – *gully*) può favorire l'innescò di fenomeni franosi (May, 2002; VanDine & Bovis, 2002; Crosta et al., 2003; Imaizumi et al., 2007). A tal proposito, la previsione temporale della pericolosità è eseguita in termini di tempi

di ritorno degli agenti stessi dell'erosione (portate del corso d'acqua, livelli del pelo libero, frequenza delle mareggiate ecc.).

Precipitazioni

Le precipitazioni sono tra le cause principali dell'innescò delle frane. L'effetto delle precipitazioni consiste nell'aumento della pressione dell'acqua interstiziale e la conseguente riduzione degli sforzi efficaci e, quindi, della resistenza al taglio (Terzaghi, 1950).

In letteratura esistono numerosi studi per l'identificazione delle relazioni tra frane e precipitazioni. I dati pluviometrici sono di facile acquisizione in aree dotate di stazioni meteorologiche e sono utili sia in fase previsionale (stima della pericolosità) che in fase di prevenzione (attuazione di sistemi di allarme per la mitigazione del rischio).

Gli approcci utilizzati sono riconducibili alle categorie riportate in Polemio & Petrucci, (2000) e di seguito elencate:

1. Relazioni empiriche per determinare possibili soglie d'innescò tramite ricostruzione di curve di durata-intensità delle precipitazioni e frane
2. Metodi per la ricostruzione di precipitazione cumulativa e antecedente gli eventi di frana
3. Metodi per la ricostruzione della precipitazione di lungo termine
4. Metodi per il calcolo della precipitazione reale
5. Metodi idrogeologici semplificati
6. Metodi integrati precipitazione-analisi di stabilità
7. Metodi completi di versante.

Tali approcci possono essere raggruppati in tre distinte categorie di modelli:

- a) *modelli statistici o empirici*: ricerca di una correlazione diretta fra altezza di precipitazione, in un determinato intervallo di tempo, e innescò dei movimenti franosi.
- b) *modelli deterministici*: si utilizzano modelli idrologici per la previsione dei parametri concernenti il bilancio idrico (afflussi, deflussi, infiltrazione efficace) e modelli idrogeologici per la previsione delle relazioni tra altezza piezometrica e ricarica della falda. Considerata la complessità di definizione dei parametri, tali modelli si basano su leggi essenzialmente empiriche.

c) *modelli misti*: integrano le precedenti strategie; ad esempio la ricarica della falda si basa sul modello idrologico mentre la risposta piezometrica si correla statisticamente alla ricarica.

Generalmente la taratura dei modelli deterministici o misti (metodi 4-7), si basa sulla conoscenza delle oscillazioni piezometriche nel tempo.

I modelli empirici (metodi 1-3) presuppongono il reperimento di serie temporali di precipitazione (intensità orarie o giornaliere) per periodo statisticamente significativo a cui associare la probabilità di occorrenza di "valori soglia" delle stesse. Il dato indispensabile per questi modelli è la serie temporale di intensità di precipitazione $x(t)$ per ricavare una funzione $y(t)=f[x(t)]$ alla quale associare la probabilità di occorrenza $P(E)$ di un evento franoso (Cascini & Versace, 1986, 1988). La funzione $y(t)$ può essere diversa a seconda del tipo di modello impiegato (altezza di precipitazione cumulata in un certo periodo di tempo, parametri del bilancio idrologico, ecc.).

Generalmente, per la previsione della pericolosità, l'occorrenza di fenomeni franosi è associata ad eventi di precipitazione estremi, soprattutto quelle superficiali (es. *soil slips*) a causa della veloce risposta delle pressioni interstiziali; pertanto la stima della probabilità può determinarsi con i metodi di analisi statistica normalmente usati in idrologia (es. Gumbel, log-normale) (NERC, 1975; Maione & Moisello, 1981).

La definizione di "soglie pluviometriche" è semplice per le frane superficiali di prima attivazione in terreni di permeabilità medio-alta (colate o scivolamenti in sabbia o detrito), caratterizzati da un incremento delle pressioni interstiziali in funzione delle piogge brevi ed intense. Altri autori utilizzano le relazioni fra durata e intensità normalizzata, data dal rapporto fra la precipitazione nell'intervallo di tempo della durata considerata e la precipitazione media annua (Govi & Sorzana, 1980; Cannon & Ellen, 1988).

Per frane di tipo scivolamento più profonde le relazioni fra intensità e durata si rivelano spesso inadeguate, poiché è forte l'influenza delle precipitazioni antecedenti l'innescò della frana. In questi casi il parametro utilizzato è l'altezza di pioggia cumulata; a tal proposito, Cascini & Versace (1986, 1988) hanno proposto di ricavare le soglie critiche in base ad un'analisi statistica dei massimi annuali delle piogge cumulate in n giorni consecutivi, in modo da selezionare il valore di n a cui corrisponda la migliore soglia.

Per quanto riguarda invece le frane più profonde in terreni a bassa permeabilità e caratterizzate da fenomeni di riattivazione, la previsione è

condizionata dalla fluttuazione della falda acquifera, a sua volta influenzata dal regime pluviometrico di lungo termine (precipitazioni mensili o stagionali). In letteratura sono stati proposti numerosi parametri idrologici per ricavare correlazioni con gli eventi di riattivazione di frane preesistenti (Hutchinson, 1969; 1970; Hutchinson & Gostelow, 1976; Sangrey et al., 1984) che non hanno portato a risultati soddisfacenti, per cui è preferibile predisporre sistemi di monitoraggio delle pressioni neutre in modo da ottenere relazioni indipendenti fra precipitazioni e oscillazioni della falda e fra queste e l'occorrenza dei fenomeni franosi.

Terremoti

È ampiamente riconosciuto che i terremoti rappresentano una delle cause scatenante i movimenti franosi. Gli effetti di un terremoto sull'innescamento di una frana possono essere diretti o indiretti; nel primo caso le frane si attivano con l'evento sismico, mentre nel secondo caso si manifestano con un ritardo variabile da ore a giorni (Hutchinson, 1993); ad esempio, in Friuli (Govi, 1977) e in Irpinia (D'Elia et al., 1985; Cotecchia et al., 1986), gli effetti diretti del sisma sui versanti furono costituiti da fenomeni di crollo di ridotte dimensioni, mentre le frane principali, solitamente riattivazioni di fenomeni preesistenti, avvennero successivamente all'evento tellurico.

Il maggiore effetto diretto consiste nell'incremento degli sforzi di taglio per l'applicazione transitoria di una forza d'inerzia orizzontale molto efficace e destabilizzante su versanti di dimensioni ridotte, generalmente con lunghezza minore di 30 m (Hutchinson, 1987); la massima accelerazione si ha per frane di dimensioni pari a metà della lunghezza d'onda. Come detto in precedenza, gli effetti diretti di un terremoto possono determinare fenomeni di crollo di ridotte dimensioni ma, tuttavia, va sottolineato che una frana da crollo può causare l'innescamento di fenomeni franosi di dimensioni maggiori (Hutchinson & Bhandari, 1971).

Un altro degli effetti diretti del sisma, in presenza di materiali granulari sciolti saturi, è il fenomeno della liquefazione dinamica (Seed & Idriss, 1967; Seed, 1968; Valera & Donovan, 1977; Crespellani et al., 1988). Il terremoto può determinare la totale perdita di resistenza al taglio del materiale che può innescare colate anche su versanti con pendenze blande. Seed (1975) sostiene che le maggiori frane innescate da terremoti sono legate, più o meno direttamente, a fenomeni di liquefazione che conferiscono alle frane un'elevata

velocità e un'ampia distanza di propagazione. La previsione della possibilità di liquefazione si basa, oltre che sui parametri del sisma atteso (magnitudo, durata, distanza dall'epicentro, accelerazione massima al sito) sulla stima di un potenziale di liquefazione del terreno in funzione di vari parametri geotecnici - granulometria, saturazione, densità relativa, stato tensionale *in situ* iniziale, ecc. - (Crespellani et al., 1988).

Gli effetti indiretti determinano abitualmente la riattivazione di frane preesistenti, anche di considerevoli dimensioni, in materiali coesivi, a causa di una progressiva diminuzione della resistenza al taglio (Lemos et al., 1985; Sassa, 1992) che può spiegare il ritardo fra la scossa sismica e la riattivazione delle frane.

Le soglie di innesco di queste frane possono essere definite in funzione dei parametri di risposta sismica locale (intensità, accelerazione di picco, etc.) o della sorgente (magnitudo).

Nel primo caso, con un approccio di tipo deterministico, è possibile effettuare analisi di stabilità per ricavare il valore di accelerazione (accelerazione critica) tale da portare il fattore di sicurezza all'unità. Le limitazioni di questo approccio risiedono nell'incertezza dei parametri di resistenza dei terreni e del regime delle pressioni interstiziali in condizioni dinamiche; inoltre, l'accelerazione critica può essere confrontata con i valori di accelerazione di picco al sito solo per frane di modeste dimensioni e, secondo Newmark (1965) e Sarma (1979), non è indicativa delle condizioni di stabilità.

Pertanto sarebbe più opportuno ricorrere alle relazioni empiriche fra l'innesco delle frane e, per esempio, l'intensità al sito o la magnitudo alla sorgente; ad esempio, Keefer (1984) ha proposto una relazione tra la massima distanza epicentrale, in funzione della magnitudo, entro cui un terremoto possa innescare una frana. Tali relazioni, ricavate per terremoti negli Stati Uniti, sono accettabili anche per il territorio italiano (Del Prete et al., 1992); le soglie di magnitudo minima sono rispettivamente 4 per i crolli, 4.5 per gli scivolamenti e 5 per le colate ed i fenomeni di liquefazione (Fig.23).

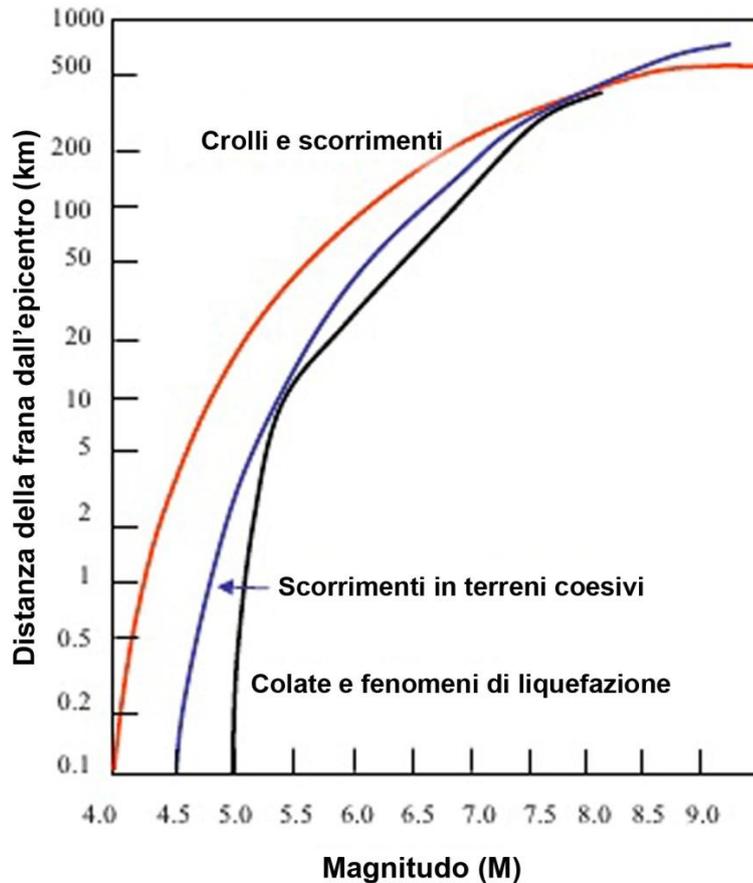


Figura 23 - Relazione tra la distanza epicentrale, in funzione della magnitudo, e l'insacco di una frana (da Keefer, 1984).

Una volta accertate, per le diverse tipologie di frana, le relazioni fra sisma e frane la pericolosità viene stimata in funzione della pericolosità sismica (Ambraseys, 1983, 1988). In altri termini, il problema della previsione temporale delle frane sismo-indotte in un'area si riassume, di fatto, nella determinazione del tempo di ritorno di un terremoto di una data magnitudo. Schematicamente la previsione temporale delle frane associate ai terremoti deve essere affrontata mediante:

- la definizione di una magnitudo-soglia;
- la definizione dei tempi di ritorno di un sisma avente una certa magnitudo.

Per la definizione della magnitudo-soglia si utilizzano approcci statistico-empirici, ossia sull'osservazione dei fenomeni indotti nel corso di terremoti di magnitudo nota. In altri casi, invece, la magnitudo-soglia può essere ricavata utilizzando un metodo analitico che permette la determinazione di un valore di accelerazione critica in funzione della pendenza di un dato versante in base alla relazione:

$$a_c = (FS-1)g \times \sin \alpha$$

dove a_c è uguale all'accelerazione critica, FS è il fattore di sicurezza, g è l'accelerazione gravitazionale e α è la pendenza del versante. Successivamente si calcola l'entità dello spostamento (D_n), solitamente utilizzando il metodo di Newmark (1965) in funzione di opportune leggi di attenuazione (intensità di Arias, I_a ; Arias, 1970):

$$\log D_n = A \log I_a - B \log a_c - C$$

dove A, B, C, sono coefficienti caratteristici.

Una volta stabilita la magnitudo-soglia, i tempi di ritorno possono essere calcolati utilizzando i cataloghi storici sui terremoti.

Erosione

L'erosione idrica è uno dei principali fattori dell'instabilità geomorfologica dei versanti e, in particolari condizioni, costituisce un fattore innescante per le frane. L'innescamento dei fenomeni franosi è favorito dall'approfondimento e dal conseguente scalzamento al piede del versante operato dai corsi d'acqua in occasione di precipitazioni meteoriche particolarmente intense.

In generale la stabilità di un versante è influenzata dai rapporti fra i ritmi di accumulo alla base del rilievo, in seguito ai processi di versante, e ritmi di rimozione, in accordo con la teoria del controllo del punto basale (*basal endpoint control*). In base a tali rapporti è possibile distinguere tre principali situazioni (Carson & Kirkby, 1972; Thorne, 1982):

- a. *rimozione impedita* - i ritmi di accumulo sono superiori ai ritmi di erosione; il pendio subisce un'aggradazione che si traduce in una

riduzione dell'intensità dei processi con una tendenza verso condizioni di equilibrio

- b. *rimozione non impedita* – i processi di accumulo e erosione hanno ritmi comparabili; il pendio è in equilibrio, l'altezza e la pendenza rimangono costanti e l'evoluzione segue il modello dell'arretramento parallelo
- c. *eccesso di erosione basale* – i ritmi di accumulo sono inferiori ai ritmi di erosione; la rimozione completa del detrito favorisce l'erosione alla base che determina un incremento dell'intensità dei processi erosivi che tenderà, nel tempo, verso una situazione di in equilibrio del versante.

Ambienti come i litorali marini, gli alvei fluviali e i solchi di erosione costituiscono entità dinamiche che modificano continuamente le loro caratteristiche geomorfologiche; pertanto, il passaggio da una condizione di rimozione impedita (stabilità) ad una condizione di instabilità, può avvenire in tempi rapidi.

La previsione temporale dei fenomeni di instabilità indotti dai processi di erosione deve necessariamente comprendere l'analisi delle dinamiche geomorfologiche e tener conto delle complesse interazioni che regolano i sistemi geomorfici.

Sulla base di ricerche storiche e datazione, è stato possibile determinare la frequenza, con tempi di ritorno variabili fra 20 e 6000 anni, dei movimenti franosi indotti dall'erosione lungo le coste dell'Inghilterra meridionale (Hutchinson, 1969; 1973; Hutchinson & Chandler, 1991). In generale, la previsione temporale della pericolosità può essere realizzata in funzione dei tempi di ritorno degli eventi erosivi (portate del corso d'acqua, livelli del pelo libero, frequenza delle mareggiate, livelli mareografici o idrometrici, ecc.). (Hutchinson, 1988;1995; Thorne, 1982).

Utilizzando i dati relativi sulle portate di picco e un modello idrologico-geotecnico per la stima dei livelli idrometrici e del regime delle pressioni interstiziali, Casagli & Rinaldi (1994) hanno valutato la previsione temporale della ricorrenza delle frane di sponda nell'alveo del fiume Sieve.

È opportuno considerare che, in terreni a bassa permeabilità, può esserci uno sfasamento fra eventi erosivi e innesco dovuto al passaggio da condizioni non drenate a drenate. Infatti, la riduzione degli sforzi totali in condizioni non drenate prodotte dal processo erosivo, causa una diminuzione delle pressioni neutre che

favorisce la stabilità a breve termine. Il successivo riequilibrio delle pressioni neutre causa una rottura ritardata rispetto all'evento erosivo.

1.1.3.2 VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il rischio è definibile come una misura della probabilità di conseguenze sfavorevoli sulla salute, sulle proprietà e sulla società, derivanti dall'esposizione ad un fenomeno pericoloso (*hazard*) di un certo tipo e di una certa intensità, in un certo lasso di tempo ed in una certa area (Smith, 2004). L'analisi del rischio connesso ai fenomeni franosi sono questioni di grande importanza per tecnici, politici e responsabili di Protezione Civile (Fell & Hartford, 1997).

Negli'ultimi anni si è assistito, a livello internazionale, ad un interesse crescente sulle problematiche legate alla valutazione della pericolosità e del rischio a diversi fenomeni naturali e non, attenzione che ha condotto ad un'unificazione a livello terminologico dei parametri che concorrono alla definizione e alla quantificazione del rischio.

Un quadro formale di riferimento per la definizione del rischio e delle sue componenti è rappresentato dal documento dell'*United Nations Disaster Relief Organization* (UNESCO-UNDRO) "*Natural disasters and vulnerability analysis*" del 1979 (Varnes & IAEG, 1984).

Per effettuare la valutazione del rischio devono essere introdotte le seguenti definizioni:

- **Pericolosità** (*Hazard, or probability of occurrence, H*), probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità, si verifichi in un dato periodo di tempo e in una data area. È espressa in termini di probabilità annuale (o di tempo di ritorno).
- **Elementi a rischio** (*element at risk, E*), la popolazione, i beni, le attività economiche, i servizi pubblici ed i beni ambientali presenti in una data area esposta ad un determinato pericolo e pertanto passibili di subire danni a seguito dell'accadimento dello stesso.
- **Esposizione al rischio** (*exposition, ES*), probabilità che un certo elemento a rischio sia esposto all'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso; l'esposizione, per quanto riguarda i fenomeni naturali, è legata essenzialmente alla mobilità ovvero alla staticità degli elementi a rischio; in termini probabilistici l'esposizione può essere vista

come la probabilità che un elemento si trovi in un certo punto in un certo momento, e coincide di fatto con la sua mobilità (Giacomelli et al., 2003).

- **Probabilità d'impatto** (*impact probability, P_i*), deriva dal prodotto della pericolosità (H) per l'esposizione degli elementi a rischio: $P_i = H \times E$. Nel caso di elementi statici come, ad esempio, un edificio, essendo il valore dell'esposizione uguale a 1, ne deriva l'uguaglianza tra probabilità d'impatto e pericolosità.
- **Valore degli elementi a rischio** (*worth of element at risk, W*), il valore economico degli elementi a rischio può esprimersi in termini monetari o in termini di numero di unità esposte ed è funzione del tipo di elemento $W=f(E)$. Per il calcolo di questo valore esistono diversi approcci: il calcolo di un valore discreto dei singoli elementi, l'utilizzo di funzioni di utilità, l'utilizzo di formule empiriche, la stima qualitativa del valore complessivo di una certa area. Nel primo approccio si procede esprimendo il valore degli elementi a rischio come sommatoria del valore discreto dei singoli elementi: si può usare come riferimento una valutazione di tipo assicurativo oppure, in alternativa, si possono trattare separatamente le diverse tipologie di elemento e a ciascuna assegnare un costo relativo, rendendo però impossibile una valutazione assoluta. Il secondo approccio utilizza le funzioni di utilità (Einstein, 1988): in pratica, anziché attraverso un valore discreto, gli elementi a rischio sono caratterizzati da un costo sociale o individuale espresso da una funzione. Un altro approccio possibile è quello che prevede l'utilizzo di funzioni empiriche per il calcolo di un valore numerico complessivo. In ultima analisi, è possibile eseguire una stima qualitativa del valore degli elementi a rischio: è questo il metodo più usato nella pianificazione di bacino in Italia. Il valore viene stimato suddividendo il territorio sulla base delle diverse zone urbanistiche, ed assegnando a ciascuna un valore relativo.
- **Vulnerabilità** (*vulnerability, V*), il grado di danneggiamento e/o perdita di un elemento a rischio determinato dall'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso di una data intensità. La valutazione della vulnerabilità comporta la comprensione delle interazioni tra il movimento franoso e l'elemento a rischio. Questa grandezza varia tra 0 (nessuna perdita) e 1 (perdita totale) ed è funzione delle caratteristiche degli elementi e dell'intensità del fenomeno: $V=f(E;I)$. La vulnerabilità quindi deve essere valutata in modo differente al variare dei fenomeni pericolosi

e per elementi a rischio differenti. In particolare, la vulnerabilità della vita umana e quella delle proprietà sono molto diverse: mentre una casa può avere uguale vulnerabilità nei confronti di una frana veloce ovvero di una frana lenta, le persone saranno più vulnerabili nel caso di un movimento veloce, dal quale non possono mettersi in salvo (Fell, 1994).

- **Danno potenziale** (*potential worth of loss, WL*), corrisponde al costo totale dei danneggiamenti e/o perdite subite a seguito dell'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso: $WL=V \times W$. Per definizione l'entità delle perdite dipende dalle caratteristiche dell'elemento a rischio (valore e vulnerabilità) e dall'intensità del fenomeno (attraverso la vulnerabilità), non dipende quindi dalla probabilità di occorrenza del fenomeno, cioè dalla pericolosità. I danni potenziali possono essere diretti o indiretti: sono diretti, quando la perdita di funzionalità è causata dall'azione diretta sulla struttura fisica; sono indiretti, se le perdite di funzionalità sono causate dai legami esistenti tra l'elemento ed il sistema territoriale e socio-economico.
- **Rischio specifico** (*specific risk, RS*): grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità. E' espresso in termini di probabilità annua, ed è funzione della pericolosità e della vulnerabilità.
- **Rischio totale** (*total risk, R*): atteso valore delle perdite umane, dei feriti, dei danni alla proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un particolare fenomeno naturale. E' espresso in termini di costo annuo oppure di numero o quantità di unità perse per anno.

Pericolosità (H)

Nell'analisi del rischio assume particolare rilievo scientifico l'identificazione e la comprensione dei diversi livelli di pericolosità. La valutazione della pericolosità, ovvero la caratterizzazione dell'imprevedibilità di un fenomeno franoso, costituisce un'operazione complessa e richiede, per prima cosa, la specificazione della probabilità di occorrenza dell'evento, sia a livello spaziale, cioè dove si può verificare una frana, sia a livello temporale, ovvero quando uno specifico fenomeno franoso può avvenire in un determinato versante. In un secondo momento, diventa importante la valutazione del tipo di fenomeno atteso, della sua intensità e della possibile evoluzione del movimento. I metodi e parametri per la stima della suscettibilità sono stati ampiamente trattati nei paragrafi precedenti.

Più in dettaglio, possiamo individuare le seguenti fasi nella progressione del lavoro di valutazione della pericolosità:

- Cartografazione delle aree in frana;
- Definizione delle caratteristiche del movimento (tipo, velocità, volumi e/o spessori).
- Stima della frequenza probabile del fenomeno (tempi di ritorno).
- Stima e definizione dei livelli di pericolosità.

Elementi a rischio (E)

Gli elementi a rischio sono rappresentati dalla popolazione, le proprietà, le attività economiche, i beni e i servizi presenti in una determinata area soggetta al fenomeno potenzialmente pericoloso (Varnes & IAEG, 1984), e sono caratterizzati dal loro valore economico (W). L'approccio utilizzato per la valutazione degli elementi a rischio consiste in una stima qualitativa complessiva del valore relativo degli elementi; solitamente viene calcolato il valore del singolo elemento e moltiplicato poi per il numero complessivo degli elementi presenti. A seconda della tipologia dell'elemento la quantificazione degli elementi a rischio può essere di tipo discreto (es: persone, edifici) o espressa per unità di superficie (es: terreni) (Aleotti & Polloni 2005).

Senza entrare nello specifico, il calcolo del valore può essere fatto utilizzando diversi approcci:

- Sommatoria del valore discreto dei singoli elementi;
- Gli elementi a rischio vengono caratterizzati da funzioni individuate sulla base dell'utilità sociale o individuale di ogni elemento. Il valore finale viene espresso come sommatoria delle funzioni di utilità dei singoli elementi a meno di un peso da attribuire al singolo elemento nell'utilità complessiva.
- Utilizzo di formule empiriche in cui il valore totale di un elemento è definito dalla somma (eventualmente pesata) dei diversi fattori che lo compongono.
- Il valore viene espresso in termini qualitativi come totale del valore relativo degli elementi esposti a rischio. Questa metodologia risulta molto utile nel caso di aree molto vaste.

Esposizione al rischio (ES)

Per esposizione al rischio si intende invece la probabilità che un certo elemento sia esposto all'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso. In letteratura il concetto di esposizione per i fenomeni naturali non è stato formalizzato in modo sistematico.

L'esposizione al rischio è una caratteristica degli elementi a rischio che spesso non viene considerata in modo esplicito. In generale essa si riferisce a quanto e come un certo fenomeno interagisce con gli elementi a rischio, ed è pertanto in funzione sia delle caratteristiche proprie dell'elemento, sia dell'intensità con cui l'elemento interagisce con il fenomeno potenzialmente pericoloso. Per quanto riguarda i fenomeni naturali, l'esposizione è legata essenzialmente alla mobilità/staticità dell'elemento a rischio, e, in particolare, alla probabilità che tale elemento si trovi nel punto x,y al tempo t :

$$ES = p(E=x,y) \times p(E=t)$$

Nel caso in cui il fenomeno pericoloso non abbia una cinematica lenta oppure sia già avvenuto (massi che cadono o che sono già caduti in mezzo ad una strada), l'esposizione degli elementi mobili sarà influenzata dalla reazione dell'elemento al pericolo (fuga, deviazione, arresto, ecc.). Questa reazione è influenzata da parametri quali la visibilità del fenomeno, la reattività dell'elemento a rischio, la presenza di vie di fuga, ecc. Queste due ultime caratteristiche sono parte della vulnerabilità. Di conseguenza l'esposizione è funzione della vulnerabilità.

In letteratura sono stati proposti alcuni metodi che, seppur non sempre in modo esplicito, permettono una valutazione dell'esposizione.

Un esempio classico di metodologia è quella elaborata negli Stati Uniti per la sicurezza del traffico stradale in relazione al pericolo di crolli, il cosiddetto Rockfall Hazard Rating System (RHRS, Pierson, 1990). Il metodo permette di valutare il rischio da caduta massi sulle strade e graduare le priorità di intervento, mentre prima della sua realizzazione queste ultime erano determinate dalla gravità della situazione geologica o l'importanza dell'arteria stradale. I parametri utilizzati sono:

- 1) altezza della scarpata,
- 2) efficacia dei valli paramassi esistenti,
- 3) tempo necessario ad un veicolo per l'attraversamento di un'area a rischio,

- 4) distanza nicchia/strada in linea d'aria,
- 5) larghezza della strada,
- 6) caratteristiche geologiche,
- 7) volume dei crolli pregressi,
- 8) presenza d'acqua,
- 9) storia delle instabilità da crollo.

L'esposizione è espressa dal tempo necessario ad un veicolo per l'attraversamento. Il criterio in base al quale è possibile valutare le possibili conseguenze di un eventuale dissesto consiste nell'assegnazione di un punteggio agli elementi sopra elencati (Tab.15). Tale elenco mette in evidenza la difficoltà nella valutazione del rischio per problemi di tipo dinamico, ossia in cui una parte degli elementi a rischio sia stazionaria ed una parte sia invece di tipo transitorio (Crosta & Locatelli, 1999).

CATEGORIA		CRITERIO DI VALUTAZIONE E PUNTEGGIO				
		3 punti	6 punti	27 punti	81 punti	
ALTEZZA DEL PENDIO		7,5 m	15 m	22,5 m	30 m	
EFFICACIA DEL VALLO		Buona	Mediocre	Scadente	Inefficace	
% DISPONIBILE DI DISTANZA DI VISIBILITÀ PER L'ARRESTO		Intera distanza di visibilità per l'arresto	80% della distanza di visibilità	60% della distanza di visibilità	40% della distanza di visibilità	
LARGHEZZA STRADA		13,20 m	10,80 m	8,40 m	6 m	
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	CASO 1	CONDIZIONI STRUTTURALI	Giunti discontinui, giaciture favorevoli	Giunti discontinui, giaciture casuali	Giunti discontinui, giaciture sfavorevoli	Giunti continui, giaciture sfavorevoli
		ATTRITO	Sup. scabre e irregolari	Sup. ondulate	Sup. piane	Sup. levigate o riempimenti argillosi
	CASO 2	CONDIZIONI STRUTTURALI	Quasi omogenee	Debole eterogeneità	Media eterogeneità	Elevata eterogeneità
		DIFFERENTE ERODIBILITÀ	Scarsa	Media	Elevata	Molto elevata
DIAMETRO DEL MASSO		0,3 m	0,6 m	0,9 m	1,2 m	
VOLUME DEL CROLLO PER EVENTO		2,3 m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,2 m ³	
COND. CLIMATICHE ED ACQUE SOTTERRANEE		Piogge da scarse a moderate, assenza di periodi di gelo, acque sotterranee assenti	Piogge moderate, brevi periodi di gelo, presenza intermittente di acque sotterranee	Piogge elevate, lunghi periodi di gelo, presenza continua di acque sotterranee	Piogge molto elevate, lunghi periodi di gelo, presenza continua di acque sotterranee	
FREQUENZA DEI CROLLI		Pochi crolli	Crolli occasionali	Molti crolli	Crolli continui	

Tabella 15 - Categorie del metodo RHRS e punteggi relativi (da Pierson et al., 1990).

Vulnerabilità (V)

La vulnerabilità rappresenta il grado di perdita che è indotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio a causa del verificarsi di un fenomeno naturale di una certa intensità (Varnes & IAEG, 1984). In pratica la vulnerabilità esprime il raccordo che lega l'intensità del fenomeno alle sue possibili conseguenze. Essa può essere determinata o con un approccio di tipo quantitativo o con metodi qualitativi (Crosta et al., 2001).

La letteratura sull'argomento mostra la prevalenza di approcci del tipo euristico, che portano ad una stima qualitativa o semi-quantitativa della vulnerabilità espressa in classi; questi metodi si basano su stime soggettive (Fell, 1994) o sull'utilizzo di matrici. Solitamente, in studi preliminari, la vulnerabilità viene posta, cautelativamente, uguale a 1, considerando la distruzione completa di un elemento interessato da una frana.

In generale, l'approccio, di tipo qualitativo, prevede di distinguere in quattro differenti categorie di danno le conseguenze di un determinato movimento franoso:

- **Danni trascurabili (T):** presenza di fessure capillari nell'intonaco delle case o sul manto stradale; la funzionalità e la stabilità del bene non sono compromesse. Questa tipologia di lesioni può essere causata anche da altri processi, quali essiccamento dell'intonaco, vibrazioni o assestamenti e cedimenti strutturali.
- **Danni moderati (M):** presenza di fessurazioni centimetriche sulle mura esterne degli edifici, le lesioni possono interessare anche i rivestimenti rigidi delle finestre o delle porte; la stabilità non è compromessa ed i danni possono essere riparati velocemente, le riparazioni non sono urgenti.
- **Danni funzionali (F):** deformazioni importanti, fessure largamente aperte sulle strutture portanti, porte e finestre inutilizzabili. La funzionalità e la stabilità delle strade risultano compromesse. Le riparazioni sono indispensabili e costose, sono opportuni provvedimenti di evacuazione.
- **Danni strutturali (S):** distruzione parziale o totale del bene, cedimento di pavimenti, disarticolazione delle pareti, brecce nei muri. E' necessario evacuare immediatamente gli edifici e provvedere al puntellamento e transennamento delle strutture. Può rendersi necessaria la demolizione, in La letteratura sull'argomento mostra la prevalenza di approcci del tipo euristico, che portano ad una stima qualitativa o semi-quantitativa della vulnerabilità espressa in classi; questi metodi si basano su stime

soggettive (Fell, 1994) o sull'utilizzo di matrici. Solitamente, in studi preliminari, la vulnerabilità viene posta, cautelativamente, uguale a 1, considerando la distruzione completa di un elemento interessato da una frana.

Le frane possono interessare gli elementi a rischio con meccanismi di impatto molto diversi: collisione, seppellimento, aumento delle pressioni del terreno, deformazioni plastiche, compressioni o torsioni, spostamenti ecc. Il tipo ed il grado con cui si manifestano questi meccanismi dipende, generalmente, dal tipo di frana (Fig.24), anche se molte frane mostrano dei comportamenti complessi con una varietà di meccanismi di impatto (Glade et al., 2005).

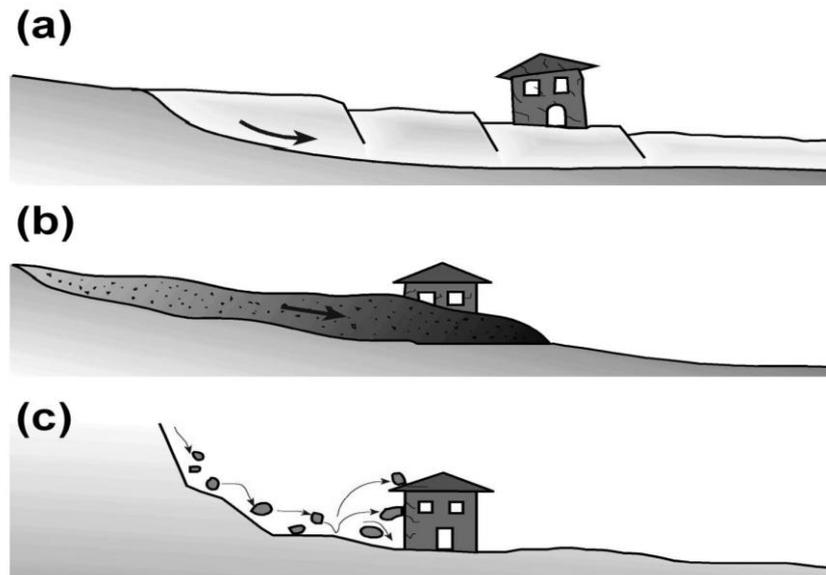


Figura 24 - Rappresentazione schematica dei danni agli edifici per differenti tipi di frana. (a) scivolamenti s.l.; (b) colate detritiche; (c) crolli/ribaltamenti (Flageollet, 1999).

Il metodo quantitativo è finalizzato alla determinazione per ogni elemento a rischio di un valore numerico compreso tra 0 (nessuna perdita) e 1 (perdita totale) a partire dal quale è poi calcolata la vulnerabilità complessiva (Leone, 1996; Fell, 1994; Wong, 1997). Date le numerose variabili in gioco il calcolo della vulnerabilità è molto complesso. Tra di esse possiamo elencare:

- intensità del fenomeno franoso; ovviamente più intenso è il fenomeno maggiore è la vulnerabilità dell'elemento;
- aspetto costruttivo e strutturale dell'elemento;
- posizione dell'elemento rispetto al fenomeno;
- presenza di eventuali protezioni.

Analogamente alla pericolosità, è necessario definire a priori la tipologia di unità territoriale di riferimento anche se non necessariamente tale unità deve essere uguale a quella utilizzata per l'analisi di pericolosità.

Rischio (R)

Il rischio viene solitamente definito come una misura della probabilità di conseguenze sfavorevoli per la salute, le proprietà e la società, derivanti dall'esposizione ad un fenomeno pericoloso di un certo tipo e di una certa intensità, in un certo lasso di tempo ed in una certa area (Smith, 2004). La valutazione del rischio rappresenta il passo finale di tutte le valutazioni appena descritte.

Per quanto riguarda un fenomeno naturale quale è una frana, possiamo distinguere un rischio specifico (**RS**) e un rischio totale (**R**). Il primo viene definito, da Canuti & Casagli (1996), come "il grado di perdita attesa quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale di una data intensità", è espresso in termini di probabilità annua, ed è funzione della pericolosità e della vulnerabilità **RS=f(H;V)**. Il rischio totale è definito come "il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle interruzioni delle attività economiche dovuti ad un certo fenomeno naturale", ed è espresso in termini di costo annuo o quantità di unità perse per anno **R=f(H;W)**.

La valutazione quantitativa del rischio può essere condotta tramite l'utilizzo di formule che tengano conto della pericolosità e delle conseguenze dell'evento su eventuali elementi a rischio:

$$RS=H \times ES \times V = Pi \times V$$

$$R=RS \times W = Pi \times WL$$

dove:

R = rischio totale

RS = rischio specifico

H = pericolosità

ES = esposizione al rischio degli elementi a rischio

V = vulnerabilità

Pi = probabilità di impatto = **H×ES**

W = valore degli elementi a rischio

WL = danno potenziale

La determinazione del rischio specifico consente di valutare gli effetti di un fenomeno pericoloso indipendentemente dal calcolo del valore degli elementi a rischio. Si tratta di un'operazione poco agevole, per le difficoltà insite nei processi di stima economica non solo dei beni direttamente coinvolti, ma anche delle conseguenze indirette associate alla perdita di proprietà. Nel caso di attività industriali, ad esempio, ai danni materiali alle strutture andrebbero sommati i mancati guadagni derivanti dall'interruzione della produzione, la perdita di clienti e la perdita di posti di lavoro. Un altro caso emblematico può essere quello in cui una strada che collega un ospedale al tessuto urbano viene interessata da un fenomeno franoso: nella valutazione del valore dell'elemento strada si dovranno considerare, oltre ai costi di ripristino della viabilità, anche i costi per la perdita di funzionalità dell'ospedale, non più raggiungibile.

Come si è visto, solitamente, il rischio viene differenziato a seconda dell'elemento considerato, per questo può essere espresso in termini di percentuale, numero o quantità di unità perse per anno. Un esempio di applicazione della zonazione da rischio è fornito dalle indicazioni del DPCM 29.09.1998 che definisce le 4 classi di rischio totale cui deve rifarsi i pianificazione di bacino in materia di difesa del suolo (Tab.16).

Rischio		Descrizione
moderato	R₁	per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali;
medio	R₂	per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche
elevato	R₃	per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
molto elevato	R₄	per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socioeconomiche.

Tabella 16 - Classi di rischio totale utilizzati per la pianificazione di bacino in materia di difesa del suolo (DPCM 29.09.1998).

La valutazione e la caratterizzazione del rischio sono basate sul triangolo di relazioni esistenti tra analisi del rischio, valutazione del rischio e gestione del rischio. L'analisi del rischio risponde alla domanda "cosa può succedere", attraverso l'identificazione e l'analisi del fenomeno pericoloso (tipologia, intensità, probabilità di accadimento) e attraverso una stima delle conseguenze, sulla base degli elementi a rischio e della loro vulnerabilità. Alcuni autori (Plattner, 2005) definiscono la risultante di questa analisi come Rischio Oggettivo (R_{obj}), cioè la frequenza (F) di un certo fenomeno avente una data conseguenza (E):

$$R_{obj} = F \times E.$$

Una volta definito il rischio, specifico o totale o oggettivo, si deve passare alla valutazione del rischio: un processo di valutazione etico-morale e socio-politica, nel quale viene confrontato il valore di rischio determinato con il rischio accettabile. Ci si deve chiedere, cioè, quali siano le conseguenze che una società è preparata ad accettare senza un definito programma di gestione; concetto da non confondere con il rischio tollerabile (o rischio residuo), definito come livello di rischio con il quale una società è disposta a convivere, una volta intraprese azioni di mitigazione, controllo e monitoraggio dello stesso. Le soglie

di rischio accettabile dipendono dal tipo di fenomeno indagato: a parità di frequenza, per un sisma saranno accettate perdite ben maggiori di quelle, ad esempio, per un incidente industriale. C'è anche da notare, come ricorda Fell (1994), che l'opinione pubblica sembra tollerare elevati livelli di rischio (fino a 10^{-2} per anno in termini di rischio specifico) se esposta volontariamente (ad esempio per incidenti stradali), mentre la soglia scende di tre, quattro ordini di grandezza nel caso di rischio involontario (rischi industriali, incendi, calamità naturali).

Sulla base dei risultati emersi, la gestione del rischio mira a ridurre i rischi inaccettabili e a prevenire altri rischi, al fine di mantenere il sistema in uno stato di sicurezza. "Cosa dobbiamo fare" è la domanda a cui politici e amministratori devono poter rispondere, combinando le conoscenze del rischio oggettivo e del rischio accettabile, sulla base di principi economici e tecnologici. Le opzioni disponibili per la riduzione del rischio da frana si possono raggruppare in cinque gruppi fondamentali:

1. misure indirizzate alla diminuzione della pericolosità: generalmente si tratta di soluzioni ingegneristiche, il cui obiettivo è diminuire la frequenza e/o la grandezza dei fenomeni franosi;
2. riduzione della vulnerabilità, ovvero consolidamento dei beni a rischio e realizzazione di opere di protezione per ridurre il coinvolgimento dell'elemento a rischio;
3. riduzione del numero di elementi a rischio, ovvero delocalizzazione dei beni esposti in aree non interessate dal fenomeno pericoloso;
4. aumento delle soglie di rischio accettabile, tramite la predisposizione di sistemi di allerta, educazione ed informazione; come abbiamo visto precedentemente, infatti, le soglie di rischio consapevole possono essere molto più elevate rispetto a quelle di rischio involontario;
5. aumento delle soglie di rischio tollerabile, da realizzarsi attraverso una condivisione delle perdite: sistemi di assicurazione, aiuti e compensazioni.

Lo studio del rischio può quindi essere considerato un punto di incontro e convergenza di varie competenze e discipline: criteri tecnico-scientifici sono impiegati nella valutazione della pericolosità. La determinazione della vulnerabilità e del valore monetario dei danni potenziali si basa su criteri socio-economici, mentre tutta la parte riguardante la stima del rischio, la gestione e la riduzione costituiscono un ambito che afferisce tipicamente alle responsabilità politiche (White et al., 1992). La riduzione del rischio può avvenire attraverso l'adozione di misure di mitigazione oppure attraverso misure di prevenzione. Per

mitigazione del rischio si intende l'insieme dei provvedimenti atti a ridurre la severità dei danni attesi per le persone e le proprietà; la prevenzione, invece, consiste nelle attività volte ad evitare che un certo fenomeno avvenga, ovvero a far sì che la probabilità che si verifichi diminuisca.

1.1.3.3 METODOLOGIA APPLICATA PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DA FRANA

Il seguente paragrafo descrive le linee metodologiche per la redazione della cartografia sulla pericolosità da frana e del rischio associato. L'attività si articola secondo quattro distinte fasi:

1. Redazione della carta inventario dei movimenti franosi.
2. Valutazione dei livelli di pericolosità reale da frana.
3. Valutazione della suscettibilità o pericolosità potenziale da frana.
4. Valutazione del rischio da frana.

Per la definizione del rischio da frana è necessaria, oltre alla valutazione della pericolosità anche quella del danno potenziale (Fig.25). La combinazione delle informazioni raccolte riguardanti l'intensità e le diverse tipologie di frana, la posizione del tratto autostradale rispetto al fenomeno franoso, la presenza di eventuali protezioni e/o opere di mitigazione e i differenti livelli di danni attesi, permetteranno di valutare i diversi scenari di rischio.

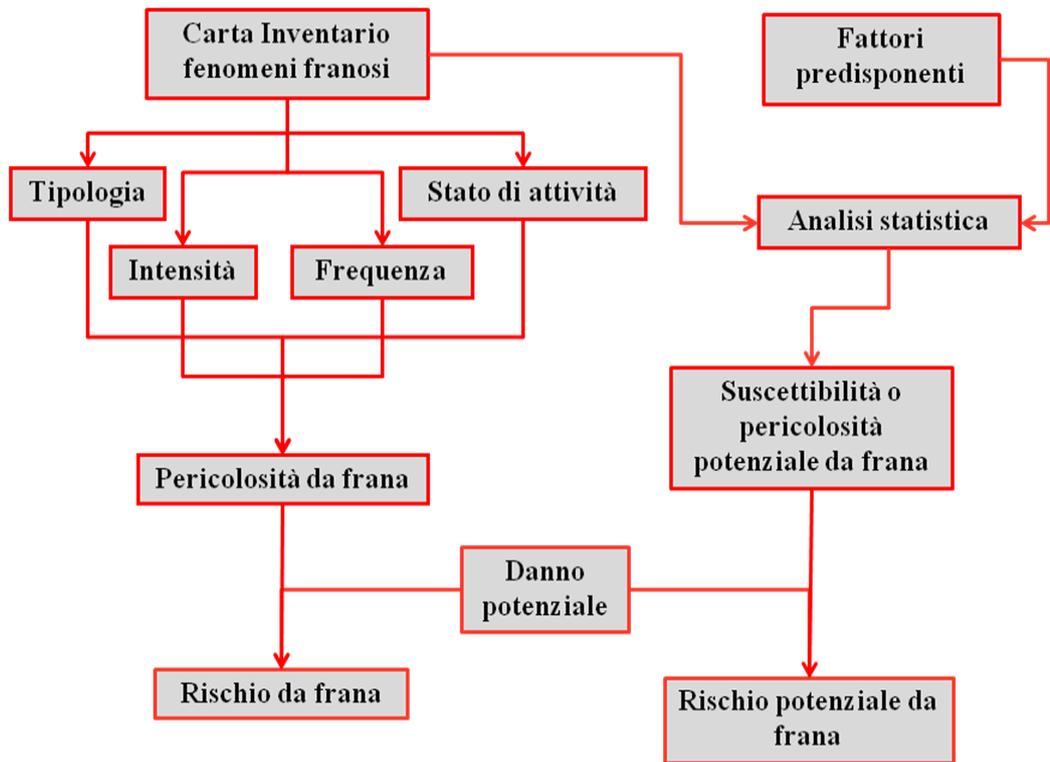


Figura 25 - Diagramma di flusso per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana.

La stima della pericolosità da frana verrà determinata seguendo due percorsi differenti (Fig.33). In una prima fase si utilizzerà un approccio geomorfologico, mediante il quale verranno individuate come aree pericolose solo quelle dove è possibile riconoscere fenomeni franosi pregressi e/o attivi, dopodiché si passerà a definire la pericolosità anche in aree, attualmente, non interessate da movimenti gravitativi di versante, cercando di cartografare le zone potenzialmente instabili (susceptibilità da frana o pericolosità spaziale), con l'applicazione di un metodo indiretto di tipo statistico. Nel determinare la susceptibilità da frana quindi si indica la probabilità di un'area all'innesco di frane ed alla stima della loro evoluzione spaziale in relazione alle sue caratteristiche geo-ambientali (geologiche, morfologiche, climatiche, ecc.).

La prima fase del lavoro prevede l'acquisizione di tutti i dati pregressi (geologici, geomorfologici, climatici, ecc.), dopodiché si passerà al lavoro di

campagna; tale attività fornirà una dettagliata analisi geomorfologica dell'area, finalizzata alla valutazione della pericolosità da frana. I rilievi verranno effettuati ad una scala di dettaglio, 1:5.000/10000.

La campagna di rilevamento sarà integrata da un'interpretazione multi-temporale di foto aeree di diverse annate, da analisi di ortofoto e immagini satellitari per meglio ricostruire l'evoluzione spazio-temporale dei processi morfogravitativi nelle aree di studio.

Il rilevamento prevede il riconoscimento e la cartografazione delle forme del paesaggio legate, essenzialmente, alla gravità. Inoltre si cercherà di rilevare tutti quegli elementi geomorfologici che possano rappresentare indizi precursori di fenomeni di instabilità: orli di scarpata di degradazione o di frana, trincee, contropendenze, scarpate di terrazzo fluviale, coni detritici, coni di *debris-flow*, presenza di fratture di tensione, alvei con tendenza all'approfondimento, grandi coltri detritiche, aree in erosione, aree interessate da *creep* e/o soliflusso. Il lavoro consentirà di realizzare una carta inventario dei fenomeni franosi (Fig.26-27), nella quale le frane verranno classificate in base al loro tipo di movimento (Cruden & Varnes, 1996), allo stato di attività, alla velocità di spostamento e alla presunta profondità del piano di scivolamento.

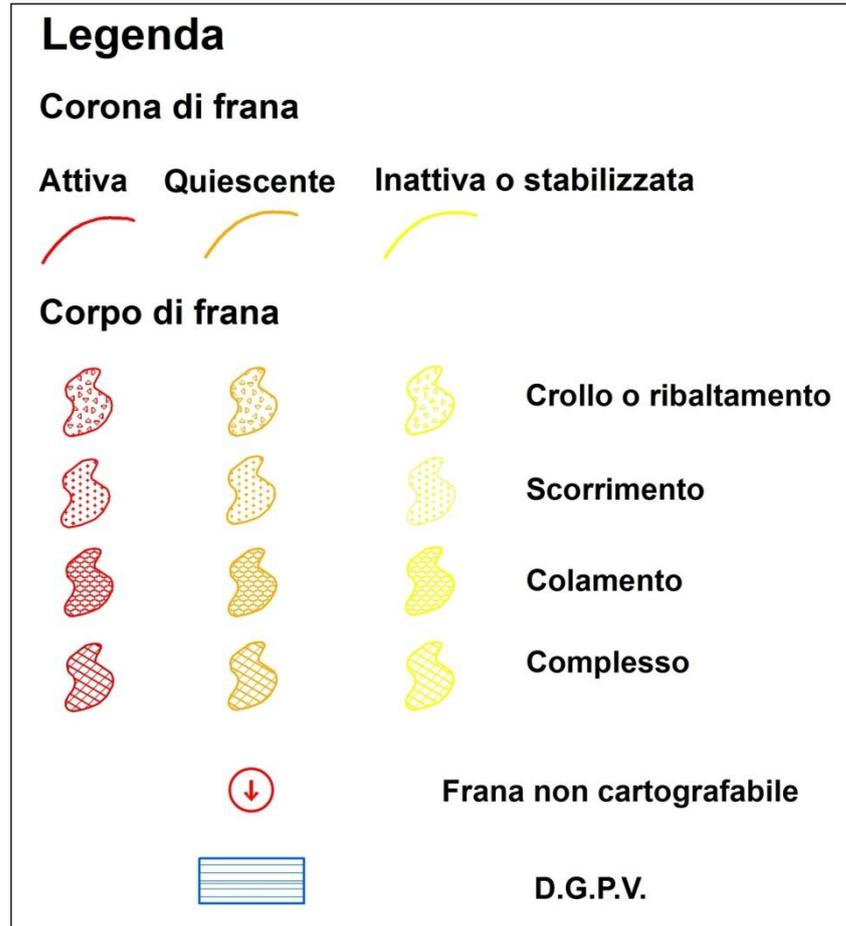


Figura 26 - Legenda della carta inventario delle frane.

CORONA di FRANA			
Spessore linea	Colore		
	Attiva	Quiescente	Inattiva o stabilizzata
1,5	Rosso R= 255 G= 0 B= 0	Arancione R= 255 G= 170 B= 0	Giallo R= 255 G= 255 B= 0
CORPO di FRANA			
Spessore linea	Colore		
	Attiva	Quiescente	Inattiva o stabilizzata
1,2	Rosso R= 255 G= 0 B= 0	Arancione R= 255 G= 170 B= 0	Giallo R= 255 G= 255 B= 0
DGPV			
Spessore linea	Colore		
1,2	Blu R= 0 G= 92 B= 230		

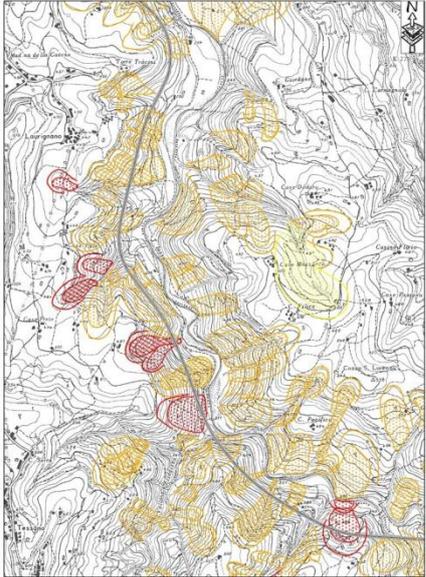


Figura 27 - Informazioni relative alle dimensioni delle linee e ai colori utilizzati per rappresentare i fenomeni franosi e stralcio della relativa carta inventario.

L'attività di campagna prevede, inoltre, di individuare e analizzare le caratteristiche geo-ambientali del territorio che rappresentano fattori predisponenti dei fenomeni franosi, quali caratteri litologici, giaciture, tettonici e morfometrici (pendenze, esposizione, curvature, ecc.) nonché i caratteri relativi alle coperture detritico-colluviali, pedologiche e di uso e copertura del suolo.

Durante il lavoro di campagna saranno raccolte informazioni sull'eventuale presenza di danneggiamenti alla rete autostradale, causate da fenomeni franosi, valutando anche lo stato di efficienza delle opere di mitigazione eventualmente presenti (muri di contenimento, gabbionate, briglie, ecc.).

Tutti i dati raccolti sul terreno verranno archiviati, gestiti ed elaborati in ambiente GIS, tramite la georeferenziazione e digitalizzazione dei dati, creando così un *geo-database* dei fenomeni franosi censiti, contenente informazioni relative alla componente spaziale e cinematica di ogni frana (Fig.28). Inoltre l'implementazione di un *geo-database*, consolidato all'interno di un GIS, consentirà l'elaborazione di carte tematiche e l'applicazione di modelli per la stima della pericolosità e del rischio da frana.

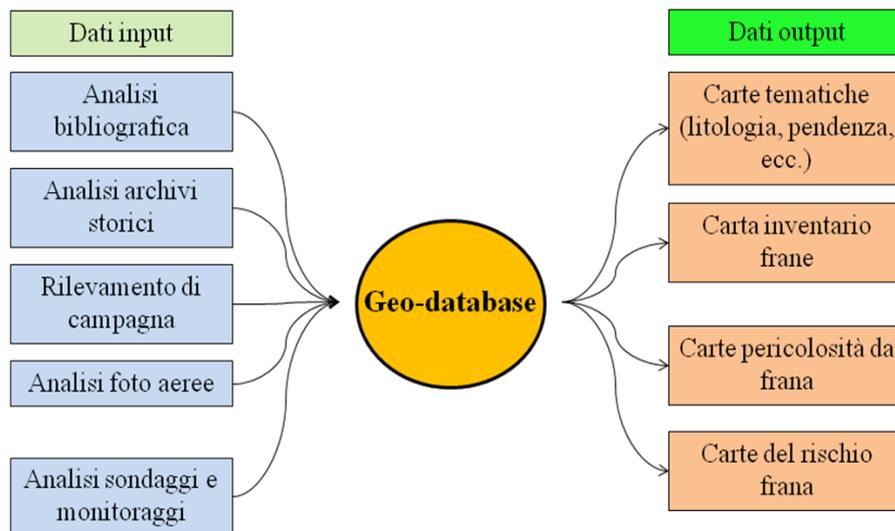


Figura 28 - Schema metodologico dell'implementazione del geo-database, in ambiente GIS, per la gestione e l'analisi dei dati territoriali raccolti.

> 1.1.3.3.1 Pericolosità da frana

La valutazione della pericolosità richiede, per prima cosa, la specificazione della probabilità di accadimento dell'evento, sia a livello spaziale, cioè dove si può verificare una frana, sia a livello temporale, ovvero quando uno specifico fenomeno franoso può innescarsi e/o riattivarsi lungo uno specifico versante. In un secondo momento, diventa importante la valutazione della tipologia di frana attesa, della sua intensità e della possibile evoluzione spazio-temporale (Canuti & Casagli, 1996; Cruden & Varnes, 1996; Fell et al., 2008).

La stima della probabilità di accadimento di un certo fenomeno franoso è impraticabile a scala provinciale e/o regionale, per l'impossibilità di reperire dati, dettagliati e uniformemente distribuiti sul territorio, sulla ricorrenza temporale dei fenomeni e le relazioni frequenza-intensità. Per questo motivo, generalmente, ci si limita ad una valutazione relativa del grado di pericolosità, senza esplicitare il tempo di ritorno della frana. La valutazione della pericolosità si basa sulla considerazione che un dato movimento franoso avviene con maggiore frequenza laddove si è verificato in passato; quindi una carta inventario delle frane, supportata da un rilevamento di dettaglio delle forme e dei processi che agiscono e che hanno agito nel passato sul territorio, può consentire una previsione

spaziale della pericolosità. Per una previsione, in termini qualitativi, della ricorrenza dei fenomeni si può fare affidamento allo stato di attività, definito in base a valutazioni di tipo geomorfologico e con il reperimento e l'analisi di dati provenienti da notizie di archivio e analisi di foto aeree multi-temporali.

Nel caso specifico, per la valutazione della pericolosità verrà utilizzato un approccio di tipo geomorfologico che permetterà la caratterizzazione dettagliata del fenomeno franoso. In tal modo è possibile giungere alla classificazione dell'intensità e della probabilità di accadimento degli eventi franosi, che, attraverso l'uso di matrici d'interazione codificate, permette la definizione dei diversi livelli di pericolosità. In dettaglio, possiamo individuare le seguenti fasi che porteranno alla valutazione della pericolosità:

- delimitazione delle aree in frana;
- definizione delle caratteristiche dei movimenti franosi (tipo, velocità, volumi e/o spessori);
- valutazione della frequenza probabile dei fenomeni franosi (probabilità di accadimento);
- valutazione dei livelli di pericolosità mediante l'applicazione di matrici di incrocio dei dati (velocità/volume della frana e intensità/frequenza probabile).

1.1.3.3.1.1 Delimitazione delle aree in frana

Questa parte del lavoro si basa, come in precedenza accennato, su osservazioni e considerazioni di tipo geomorfologico. Ad ogni fenomeno franoso individuato vengono attribuiti, oltre alla tipologia e lo stato di attività (Cruden & Varnes, 1996), anche una stima del valore dell'intensità attesa e della frequenza di accadimento (Tab.17).

Campo	Contenuto
Codice	Progressivo numerico identificativo unico dell'evento
Tipologia	Indicazione del tipo di movimento
Attività	Indicazione dello stato di attività
Area	Superficie interessata dal dissesto espressa in m ²
Profondità	Stima dello spessore dell'ammasso spostato
Volume	Stima del volume del materiale coinvolto nel movimento
Intensità	Stima dell'intensità della frana
Frequenza	Stima della frequenza probabile della frana
Pericolosità	Pericolosità del singolo fenomeno franoso

Tabella 17 - Dati da riportare nel geo-database delle frane inventariate.

Per quanto riguarda lo stato di attività le frane mappate dovranno essere distinte in:

Frane attive, il termine è utilizzato per classificare i movimenti franosi osservati durante i rilevamenti ed i sopralluoghi di campagna per i quali si hanno chiare evidenze di movimenti in atto e dall'analisi delle fotografie aeree più recenti fra quelle disponibili.

Frane quiescenti, il termine è utilizzato per classificare le frane osservate unicamente nelle fotografie aeree più vecchie, fra quelle disponibili, e che non presentano segni apprezzabili di movimento rilevabili da osservazioni dirette di campagna o dalla lettura delle fotografie aeree più recenti.

Frane inattive, il termine è utilizzato per classificare le frane relitte e/o stabilizzate e che nelle fotografie aeree più vecchie risultano modellate, in parte o parzialmente, da altri agenti morfodinamici.

L'analisi multi-temporale di foto aeree, ortofoto e immagini satellitari di annate diverse consentirà di meglio individuare l'evoluzione spazio-temporale e l'intensità dei fenomeni morfogratativi.

Le informazioni provenienti da studi di dettaglio, carte geomorfologiche e pubblicazioni, saranno utilizzate sia in fase di rilevamento dei fenomeni franosi che per valutarne lo stato, lo stile di attività, l'intensità e il tempo di occorrenza. I dati derivanti da prove e sondaggi, laddove presenti, saranno utili per la stima dei volumi del materiale coinvolto nel movimento franoso, mentre i monitoraggi possono dare indicazioni sulla cinematica e frequenza delle frane.

Da questa attività si realizzerà la carta inventario delle frane, informatizzata in ambiente GIS, che fornirà un quadro aggiornato della distribuzione dei fenomeni gravitativi, la quale costituisce la base di conoscenza e di controllo della pericolosità di un versante.

1.1.3.3.1.2 Definizione delle caratteristiche dei movimenti franosi

L'intensità o magnitudo di una frana va riferita a quei caratteri che descrivono qualitativamente o quantitativamente l'impatto dell'evento sul territorio. Il potere distruttivo di una frana, in prima analisi, è funzione sia della sua velocità sia del suo volume (dimensione), anche se nei piani di gestione della pericolosità e del rischio si considera principalmente la velocità, perché è intimamente correlata alla percezione che la popolazione esposta ha del fenomeno.

Nel caso specifico, l'intensità sarà stimata combinando le velocità massime attese per le diverse tipologie di frana con i volumi di materiale coinvolto nel movimento (severità geometrica). Nel caso dei crolli si procederà ad una stima delle dimensioni dei blocchi caduti, anziché il volume. I valori delle velocità di movimento, stimati sulla base delle diverse tipologie di frana, saranno desunti dalla bibliografia (Fell, 1994; Canuti & Casagli, 1996; Cruden & Varnes, 1996), da dati storici e da misure strumentali, ove presenti. In particolare per la stima della velocità vengono individuate tre classi (Tab.18):

- movimenti a cinematica lenta e intensità bassa, ovvero scivolamenti rotazionali e planari, colamenti e espansioni laterali;
- movimenti a cinematica rapida e intensità media, ovvero colate di terra e di detrito e frane complesse;
- movimenti a cinematica veloce e intensità alta, ovvero crolli, ribaltamenti, scivolamenti in roccia e colate detritiche.

Intensità (I)	Tipo di movimento	Velocità	Sigla
Bassa	Scorrimenti, colate, e espansioni laterali	<1m/anno	V1
Media	Colate di terra e di detrito e frane complesse	1m/anno÷1m/ora	V2
Alta	Crolli e ribaltamenti, scivolamenti in roccia e colate detritiche	>1m/ora	V3

Tabella 18 - Classi di intensità per i fenomeni franosi, che si basa sulla velocità di spostamento.

La severità geometrica (SG) di una determinata frana verrà determinata in maniera differente a seconda del tipo di movimento. Per gli scivolamenti senso lato, le colate di detrito e/o di terra, le frane complesse e gli scivolamenti in roccia, la severità geometrica verrà stimata sulla base del volume del materiale spostato (Tab.19-20). Nel caso dei crolli o ribaltamenti si procederà ad una valutazione delle dimensioni dei blocchi caduti o potenzialmente mobilizzabili (Tab.21). La stima degli spessori coinvolti nei movimenti, in mancanza di dati di sondaggi, verrà stimata empiricamente, sulla base del tipo di movimento, della morfologia e della geometria dell'area di distacco e della zona di accumulo. Indicativamente, le frane possono essere suddivise in tre macroclassi:

1. Frane superficiali (FS) con spessore <2m;
2. Frane mediamente profonde (FMP) con spessore 2-10m;
3. Frane profonde (FP) con spessore >10m.

Intensità (I)	Volume	Sigla
Molto bassa	< 50.000 m ³	SG1
Bassa	50.000÷200.000 m ³	SG2
Moderata	200.000÷500.000 m ³	SG3
Alta	500.000÷1.000.000 m ³	SG4
Molto alta	> 1.000.000 m ³	SG5

Tabella 19 - Scala dell'intensità delle frane (scivolamenti s.l.) basata sul volume della massa spostata (Fell, 1994 modificata).

Intensità (I)	Volume	Sigla
Molto bassa	< 5.000 m ³	SG1
Bassa	5.000-10.000 m ³	SG2
Moderata	10.000-50.000 m ³	SG3
Alta	50.000÷200.000 m ³	SG4
Molto alta	> 200.000m ³	SG5

Tabella 20 - Scala dell'intensità delle frane (colate di detrito e/o terra) basata sul volume del materiale spostato.

Intensità (I)	Diametro dei blocchi	Sigla
Molto bassa	< 0,5 m	SG1
Bassa	0,5÷2 m	SG2
Moderata	2÷5m	SG3
Alta	5÷10 m	SG4
Molto alta	> 10 m	SG5

Tabella 21 - Scala dell'intensità delle frane (crolli e ribaltamenti) basata sul diametro dei blocchi caduti o potenzialmente mobilizzabili (Heinimann et al., 1998 modificata).

Le classi di volume sono state ricavate dalla classificazione di Fell (1994), mentre la classificazione basata sul diametro dei blocchi è stata derivata dal lavoro di Heinimann et al., (1998). Queste classificazioni potranno subire delle modificazioni durante la fase di applicazione, in modo da poter essere adeguate ai casi di studio.

1.1.3.3.1.3 Valutazione della frequenza probabile dei fenomeni franosi

Per valutare la pericolosità un dato fondamentale è quello relativo alla probabilità di accadimento di un fenomeno franoso, ovvero conoscere il periodo di ritorno, cioè il tempo medio atteso tra due eventi consecutivi di intensità simile, espresso in anni. Teoricamente su un singolo movimento franoso è possibile, stabilire, su base statistica, i tempi di ritorno dei fattori innescanti, come ad esempio nel caso di una frana attivata da un evento meteorico o da un sisma; la cosa è più complicata e molto spesso impossibile se si lavora a scala di bacino e/o regionale, dove il numero di frane è elevato.

Nel caso specifico si è deciso di valutare la frequenza di un fenomeno franoso principalmente su base geomorfologica, con stime supportate da ricognizioni sul terreno e dall'analisi di foto aeree, ortofoto e immagini da satellite di anni diversi. Laddove disponibili, saranno utilizzate anche le informazioni derivanti da dati di monitoraggio, dati di bibliografia e ricerche su archivi storici. Pertanto vengono identificate, facendo riferimento al metodo di Heinimann et al., 1998, cinque classi di tempi di frequenza, in base ai tempi di ritorno e allo stato di attività delle frane (Tab.22).

Frequenza (F)	Tempo di ritorno	Stato attività	Sigla
Inattive	>500 anni	Frane inattive	Tr1
Episodiche a bassa frequenza	100÷500 anni	Frane quiescenti	Tr2
Episodiche a media frequenza	50÷100 anni	Frane quiescenti	Tr3
Episodiche ad alta frequenza	1÷50 anni	Frane quiescenti	Tr4
Frequenza molto alta (attive)	<1 anno	Frane attive	Tr5

*Tabella 22 - Classi di frequenza dei movimenti franosi
(Heinimann et al., 1998; Flageollet 1996 modificata).*

Le frane attive, con un tempo di ritorno inferiore ad un anno, verranno individuate per mezzo del rilevamento geomorfologico di campagna o da dati di monitoraggio, ove presenti. Evidenze di attività sono rappresentate dalla presenza di rigonfiamenti e ondulazioni del terreno, fratture aperte, inclinazioni anomale degli alberi, scarpate fresche, così come da lesioni ad edifici e/o strade.

I fenomeni quiescenti ad alta frequenza (Tr 1÷50 anni) devono essere identificati mediante il confronto di foto aeree di periodi diversi, in questo studio dal 1954 ad oggi, notizie d'archivio o bibliografiche e dati di monitoraggio. Importante sarà anche l'osservazione dei caratteri morfologici, come il grado di preservazione della morfologia, le condizioni di riempimento delle fratture, la forma del reticolo idrografico, in particolare delle aste di ordine minore.

I movimenti franosi episodici a media frequenza (Tr 50÷100 anni) sono in alcuni casi citati in documenti storici o in inventari e sul terreno hanno caratteri morfologici simili a quelli più frequenti, ma non presentano segni di attività nelle foto esaminate.

I fenomeni che danno luogo ad eventi episodici a bassa frequenza (Tr 100÷500 anni) presentano morfologia sensibilmente evoluta, a causa di una più intensa "trasformazione" da parte degli agenti esogeni, ma pur non essendo stati causa di eventi documentati non vengono considerati inattivi, perché tuttora riattivabili dalle cause che li hanno originati.

La classe delle frane inattive o episodiche a bassissima frequenza (Tr >500 anni) comprende movimenti franosi connessi ad un contesto morfo-climatico diverso da quello attuale e pertanto non riattivabili dalle cause originarie. La nicchia di distacco è poco o niente riconoscibile all'osservazione diretta o da foto aeree e la caratteristica morfologia convessa dell'accumulo risulta regolarizzata rispetto agli elementi morfologici adiacenti sul versante. L'accumulo del materiale

di frana può essere in affioramento oppure sepolto da materiali detritici più recenti, a dimostrazione dell'esaurimento della dinamica morfoevolutiva del tratto di versante considerato.

1.1.3.3.1.4 Valutazione dei livelli di pericolosità

La pericolosità (H) di un evento franoso è definita come una funzione della sua intensità (I) e dalla frequenza temporale di accadimento (F):

$$H=f(I;F)$$

In letteratura esistono diversi metodi per valutare l'intensità di una frana. Il metodo svizzero, così come altri metodi (Cardinali et al., 2002; Hungr, 1997) considera l'intensità (I) come una misura del potere distruttivo della frana e quindi la definiscono come funzione della severità geometrica (SG) e della velocità attesa (V):

$$I=f(SG;V)$$

Nel caso specifico, come è stato illustrato in precedenza, si è scelto di mantenere separate le frane per tipologia di movimento come riportato in Tabella 24. Si avranno, in tal modo, frane suddivise sulla base delle caratteristiche estensionali, cioè volume del materiale spostato e nel caso di crolli in base alla dimensione dei blocchi franati.

L'intensità verrà definita, per ogni tipologia di fenomeno franoso, e suddivisa in cinque classi attraverso l'uso della matrice di correlazione riportata in Tabella 23, che rappresenta l'intersezione tra la severità geometrica e la velocità dei differenti tipi di frana. Ad esempio, per una frana di un certo volume si avranno intensità maggiori nel caso di movimenti più veloci, come nel caso di una colata detritica rispetto ad uno scivolamento.

$I=f(SG; V)$		Velocità (V)		
		V3	V2	V1
Severità geometrica (SG)	< 0,5 m	Molto bassa		
	0,5÷2 m	Bassa		
	2÷5m	Moderata		
	5÷10 m	Alta		
	> 10 m	Molto alta		
	<5.000 m ³		Molto bassa	Molto bassa
	50.00-10.000 m ³		Bassa	
	10.000-50.000 m ³		Moderata	
	50.000÷200.000 m ³		Alta	Bassa
	200.000÷500.000 m ³		Molto alta	Moderata
	500.000÷1.000.000 m ³			Alta
	> 1.000.000 m ³			Molto alta

Tabella 23 - Intensità di una frana sulla base della velocità attesa e del volume di materiale coinvolto nel movimento. Per le frane tipo crollo è stata utilizzata la dimensione dei blocchi (da Cardinali et al., 2002, modificata).

Infine, la pericolosità da frana si calcolerà combinando i valori di intensità con quelli di frequenza di occorrenza, utilizzando la Tabella 24, tratta dal lavoro di Heinimann et al. (1998) e suddivisa in quattro classi:

- **P1 - Pericolosità bassa:** in questa classe rientrano le frane quiescenti a bassa frequenza con intensità molto bassa o bassa e le frane inattive di intensità bassa o moderata;
- **P2 - Pericolosità moderata:** in questa classe rientrano frane quiescenti ad alta, media e bassa frequenza con intensità da bassa a alta, frane inattive di intensità alta e molto alta;

- **P3** - *Pericolosità alta*: in questa classe sono incluse le frane quiescenti ad alta, media e bassa frequenza con intensità variabile da bassa a molto alta.
- **P4** - *Pericolosità molto alta*: in questa classe sono incluse tutte le frane attive e le frane quiescenti ad alta e media frequenza che presentano intensità alta e molto alta.

	$H=f(F;l)$	Frequenza (F)				
		Tr<1	Tr 1÷50	Tr 50÷100	Tr 100÷500	Tr > 500
Intensità (I)	Molto Alta	P4	P4	P4	P3	P2
	Alta	P4	P4	P3	P2	P2
	Moderata	P4	P3	P2	P2	P1
	Bassa	P4	P3	P2	P1	P1
	Molto bassa	P4	P2	P2	P1	P1
	Prob/annua	1	0,03	0,01	0,002	<0,002

Tabella 24 - Matrice di interazione utilizzata per la valutazione della pericolosità da frana (Heinimann, 1998, Cardinali et al., 2002 modificata). Prob/annua = probabilità annua che si verifichi una frana.

L'ultima riga della Tabella 24 riporta il valore indicativo, calcolato secondo la seguente formula:

$$Pr = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

che stima la probabilità (Pr) che una certa frana si metta in movimento in un certo periodo t di riferimento e la probabilità è legata al tempo di ritorno T dell'evento considerato.

Osservando la Tabella 30 si può notare che alle frane attive è stato assegnato il livello di pericolosità massimo, indipendentemente dall'intensità, le frane a

bassa frequenza (Tr 100÷500 anni) e massima intensità sono state classificate a pericolosità elevata (P3) anziché molto elevata (P4).

Alle frane attive viene assegnato il livello di pericolosità più elevato, in considerazione del fatto che l'obiettivo principale del lavoro è quello di individuare le criticità e le possibili situazioni di rischio da frana lungo i tratti autostradali scelti come casi di studio. Una frana attiva, anche se di limitata estensione e, di conseguenza, di bassa intensità, costituisce una situazione di pericolo con associato rischio per l'area in cui essa insiste.

Per quanto riguarda le frane con tempi di ritorno superiori ai 100 anni, si è ritenuto più utile, non sovrastimare la pericolosità di frane di grandi dimensioni, come riportato in diverse pubblicazioni (Varnes & IAEG, 1984; Cruden & Varnes, 1996), considerando, anche la bassa probabilità annuale di accadimento, compresa tra $2 \cdot 10^{-3}$ e 10^{-2} (Tab.24).

Tutte le operazioni illustrate in precedenza verranno effettuate tramite un sistema GIS. Gli attributi relativi ai fenomeni franosi, indispensabili per la valutazione dei livelli di pericolosità, come volume, velocità e frequenza, verranno inseriti nella banca dati GIS. Ogni frana avrà come attributi: la tipologia di movimento, lo stato di attività, l'area espressa in m^2 , la profondità del piano di scivolamento, il tipo e il volume del materiale coinvolto nel movimento, espresso in m^3 , la frequenza, la classe di velocità ed infine la pericolosità reale associata (Tab.23). L'intersezione delle matrici, descritte in precedenza, per la stima della pericolosità, verrà fatta, mediante operazioni logiche sulle tabelle degli attributi delle frane censite.

Questo processo metodologico porterà alla realizzazione della carta della pericolosità che ci darà indicazioni sui livelli di pericolosità solamente nelle aree in cui sono state cartografate frana in atto e/o pregresse.

> 1.1.3.3.2 Valutazione della suscettibilità da frana

Il principale limite della metodologia illustrata nel paragrafo precedente è insito nel fatto che la pericolosità viene definita esclusivamente in aree nelle quali si sono già verificati dei fenomeni franosi, mentre nessuna indicazione viene data sulla probabilità che in futuro si possa innescare un fenomeno franoso in quelle aree nelle quali al momento non sono presenti segni di dissesto.

È evidente dunque che questo fatto risulta essere penalizzante nel momento in cui un documento come la carta della pericolosità da frana diventa strumento decisionale per la pianificazione territoriale. Pertanto, la necessità di avere indicazioni sulla pericolosità di tutto il territorio si è deciso di integrare i risultati ottenuti nella stima della pericolosità reale con un metodo più complesso che, partendo dalla valutazione delle condizioni geologiche e geomorfologiche, permette di realizzare una zonazione territoriale della propensione a franare (suscettibilità) dell'area in esame.

La suscettibilità, intesa anche come pericolosità spaziale (Brabb, 1984), riguarda la propensione di un territorio allo sviluppo di un fenomeno naturale, senza considerare la probabilità temporale del fenomeno (Dai et al., 2002). Nel determinare la suscettibilità da frana quindi si indica l'attitudine di una zona al franamento in relazione alle sue caratteristiche fisiche, pertanto, diversi studi sono stati realizzati per stimare la suscettibilità da frana utilizzando metodi differenti (Carrara et al., 1983, 1995; Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993; Soeters & Van Westen, 1996; Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti et al., 1999; Lee & Min, 2001; Clerici et al., 2002; Zézere, 2002; Cevik E., Topal T., 2003; Fernandez et al., 2003; Suzen & Doyuran, 2004; Catani et al., 2005; Saha et al., 2005; Bartolomei et al., 2006; Falaschi et al., 2007; Greco et al., 2007; Yalcin, 2007, 2008; Caniani et al., 2008; Conoscenti et al., 2008; Magliulo et al., 2008).

Gran parte delle metodologie oggi utilizzate per la determinazione della suscettibilità da frana, si basano sull'individuazione e sulla caratterizzazione spaziale di un set di fattori predisponenti, e sulla quantificazione delle relazioni spaziali intercorrenti tra questi ed un *database* di frane pregresse, sfruttando l'assunto che le frane future si verificheranno sotto le stesse condizioni di quelle del passato (Guzzetti et al., 1999).

In generale, le procedure utilizzate si possono suddividere in quattro tipologie: metodi di analisi geomorfologica, mediante i quali si ottengono carte inventario dei fenomeni franosi, metodi euristici, metodi deterministici e metodi di analisi

statistiche, bivariate e/o multivariate (Soeters & Van Westen, 1996; Van Westen et al., 1997; Aleotti & Chowdhury, 1999). I primi due approcci sono definiti qualitativi, mentre gli altri due sono detti metodi quantitativi (Aleotti & Chowdhury, 1999). I metodi statistici garantiscono un minor grado di soggettività, rispetto ai metodi euristici e, risultano idonei per analisi di suscettibilità su vasta area; inoltre, permettono di identificare e di descrivere con maggiore precisione le relazioni esistenti tra fenomeni franosi e fattori predisponenti (Bartolomei et al., 2006). I risultati che si ottengono dalla comparazione dei fenomeni franosi con i fattori predisponenti sono estrapolati a zone attualmente prive di fenomeni franosi dove le medesime condizioni geo-ambientali che hanno favorito lo sviluppo delle frane pregresse rappresentano le probabili aree di innesco di frane future. Generalmente la prima fase di applicazione nella gran parte dei metodi utilizzati per la valutazione della suscettibilità da frana consiste nella realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi, come già discusso nel paragrafo precedente, e nella definizione e caratterizzazione dei fattori predisponenti la franosità (es. litologia, pendenza, uso del suolo).

La scelta dei fattori da utilizzare per una valutazione della propensione al dissesto avverrà selezionando quei fattori predisponenti che forniranno dati significativi una volta messi in relazione con la distribuzione delle frane.

1.1.3.3.2.1 Fattori predisponenti la franosità

La distribuzione spaziale dei fattori predisponenti la franosità e la loro parametrizzazione sono alla base della valutazione e distribuzione spaziale della suscettibilità da frana. In generale si può affermare che un'area è suscettibile al dissesto quando le sue caratteristiche intrinseche sono confrontabili con una seconda area nella quale si sia già verificato un fenomeno franoso.

La suscettibilità da frana quindi deriva dalla somma e dalle relazioni che intercorrono tra i vari fattori predisponenti che controllano la stabilità dei versanti. La conoscenza delle loro interazioni può fornire importanti informazioni sulla possibile ubicazione di frane future, consentendo così una pianificazione razionale ed uno sviluppo del territorio.

La scelta dei fattori predisponenti è considerata uno dei passi più importanti nello studio della suscettibilità da frana (Guzzetti et al., 2000; Ercanoglu & Gokceoglu, 2004), in quanto l'affidabilità e la precisione dei dati raccolti influisce sul successo del metodo applicato. Inoltre, quando si applica un metodo di valutazione della suscettibilità è molto importante definire quali fattori controllano

i diversi livelli di suscettibilità, infatti un fattore predisponente può influire maggiormente sull'innescò di frane in un'area ed essere poco significativo in un'altra area (Ercanoğlu & Gokceoglu, 2004). Questo spiega perché, per la costruzione della carta della suscettibilità da frana, possono essere utilizzati differenti fattori in base alle diverse caratteristiche geo-ambientali dell'area di studio ma anche a seconda delle tipologie di frana.

La scelta dei fattori predisponenti è, inoltre, subordinata al soddisfacimento del requisito essenziale di coprire l'intera area di studio, in quanto dati discontinui comprometterebbero l'analisi portando a distorsioni o a interpretazioni errate delle correlazioni tra ciascun fattore ed i movimenti gravitativi.

Tenuti presenti i principali lavori a livello internazionale (Van Westen, 1997; Rautela & Lakhera, 2000; Cevik & Topal, 2003; Suzen & Doyuran, 2004; Saha et al., 2005; Guzzetti et al., 2005; Lee, 2005; Yalcin, 2007) di seguito verranno descritti i fattori predisponenti maggiormente utilizzati nelle analisi di pericolosità spaziale da frana.

Litologia

La litologia è uno dei parametri fondamentali tra i fattori predisponenti la franosità, in quanto la natura del materiale e la sua struttura influenzano notevolmente il suo comportamento in relazione agli sforzi applicati dalla gravità lungo i versanti. Quindi, sulla stabilità di un pendio, sono condizionanti, prima di tutto, le caratteristiche meccaniche, come permeabilità e resistenza al taglio delle rocce e dei terreni sui quali i fenomeni gravitativi si innescano.

Nella realizzazione della carta litologica si individuano così settori litologicamente omogenei in funzione del loro comportamento geomeccanico, prendendo in considerazione, non solo la natura litologica dei terreni affioranti, ma anche tutta una serie di caratteristiche fisico-chimiche che vanno dal grado di alterazione (*weathering*), dalla compattezza o grado di cementazione alla porosità, dall'angolo di attrito interno alla coesione, alla presenza di strutture sedimentarie e tettoniche; in tal senso le litologie con analoghe caratteristiche meccaniche vengono accorpate pur avendo età differenti. La carta litologica viene realizzata percorrendo tre fasi propedeutiche: ricerca bibliografica (esame della cartografia e della documentazione esistente, dando preferenza ai lavori di maggior dettaglio, es. a scala 1:25000 e 1:10000), fotointerpretazione e rilievo in campo e definizione dei domini litologicamente omogenei (Fig. 29).

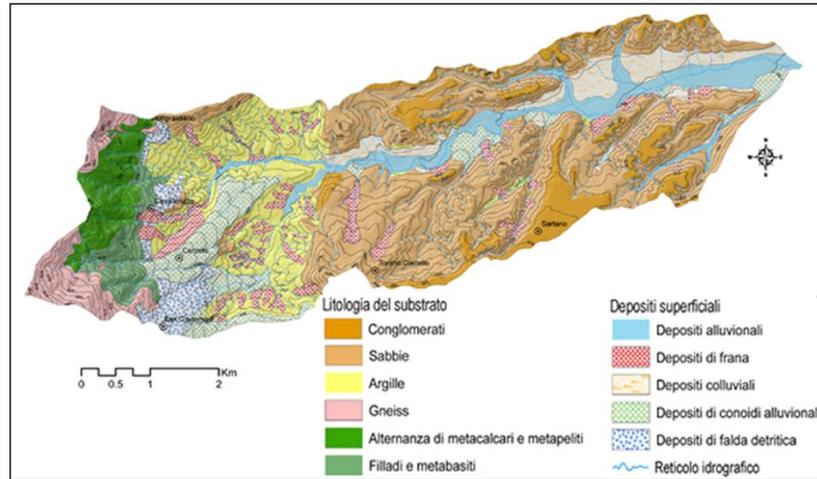


Figura 29 - Es. di carta litologica (da Conforti, 2009 modificato).

Giacitura degli strati

Un altro importante fattore che condiziona la stabilità dei versanti è rappresentato dalla disposizione geometrica delle superfici di strato in rapporto alla configurazione del versante.

La possibilità di definire l'andamento geometrico di uno strato roccioso rispetto al pendio riveste, infatti, un'importanza fondamentale al fine di poter definire la stabilità per lo meno teorica di un versante e cioè la probabilità che uno strato o un pacco di strati possa scivolare per gravità sul suo substrato. Quindi l'orientamento delle superfici di discontinuità presenti in una certa unità litologica rispetto all'andamento del sistema valle-crinale ci fornisce un primo dato sulle condizioni più o meno favorevoli di stabilità del pendio, sia che si tratti di stratificazione che di scistosità e di fessurazione.

Per quanto riguarda gli schemi grafici dei più frequenti casi di orientamento degli strati rispetto al versante, possiamo avere, a parità di caratteristiche litologiche e di acclività:

unità litologiche prive di strutture ed in condizioni di massima caoticità ed eterogeneità (es. argille scagliose, unità costituite da una pasta di fondo o matrice argillosa che ingloba frammenti e blocchi di natura e dimensioni diverse), con caratteristiche fisico-meccaniche decisamente scadenti dal punto di vista della stabilità;

- strati a franapoggio, quando la direzione degli strati risulta parallela alla cresta o crinale, cioè alla direzione del sistema versante-valle, con

una stabilità che va da molto bassa a mediocre a seconda del rapporto che intercorre fra inclinazione degli strati ed inclinazione del versante;

- strati a reggipoggio, quando gli strati inclinano in senso contrario al pendio, rappresentano una delle giaciture migliori dal punto di vista della stabilità;
- strati a traverpoggio, quando gli strati risultano obliqui rispetto al crinale, o asse del sistema cresta-valle, come stabilità può essere paragonata a quella del reggipoggio;
- strati orizzontali, hanno pendenza fino a 5° e rappresentano situazioni molto favorevoli dal punto di vista della stabilità;
- strati verticali, hanno pendenze superiori a 75° e non danno grossi problemi di stabilità, purché non si creino condizioni tali da rompere l'equilibrio esistente: infatti uno scalzamento al piede potrebbe provocare il distacco e la caduta di frammenti di strato oppure l'apertura "a libro" degli strati e di conseguenza dar luogo a crolli e/o ribaltamenti.

Per definire la diversa disposizione degli strati nei confronti dell'orientamento dei versanti viene utilizzato un metodo messo a punto da Clerici et al. (1993), e successivamente ripreso da Nardi (1996). Il metodo, seppur concettualmente complesso, risulta di rapida applicazione, grazie all'utilizzo delle più elementari funzioni GIS. La combinazione dell'inclinazione dei versanti, dell'orientamento dei versanti, dell'immersione degli strati e dell'inclinazione degli strati ha permesso di individuare le diverse situazioni che possono avere un'influenza, positiva o negativa, sulla stabilità dei versanti. Le misure di strato vengono ricavate in parte dal lavoro sul terreno e in parte dalle cartografie geologiche esistenti.

Il modello prevede per prima cosa la realizzazione di quattro carte tematiche, che poi dovranno essere combinate tra di loro. La carta dell'esposizione dei versanti e quella dell'acclività sono derivate direttamente dal DEM dell'area in ambiente GIS. Le misure di strato sono trattate in maniera automatica, lasciando che il software GIS converta la copertura puntuale delle immersioni e delle inclinazioni in due coperture di poligoni prossimali (es. Poligoni di *Thiessen* o spazializzazione tipo *kriging*). Il risultato viene poi controllato, per verificarne la congruenza con la realtà geologica e stratigrafica. Le coperture poligonali rappresentano, rispettivamente, l'immersione e l'inclinazione degli strati (Nardi, 1996).

Dalla combinazione delle quattro carte tematiche (pendenza, esposizione, immersione e inclinazione) è ottenuta una varietà di situazioni diverse, che sono poi raggruppate in macroclassi (Clerici et al., 2002).

Si delimitano quindi le aree appartenenti alle diverse classi per quanto riguarda la giacitura, alle quali poi vengono assegnati dei numeri (pesi) crescenti al crescere della sicurezza della giacitura dello strato (ad esempio avranno un numero basso le unità prive di strutture mentre avranno un numero alto gli strati a reggipoggio e rocce massicce prive di stratificazione) se si utilizza, per la valutazione della suscettibilità da frana, un metodo euristico; mentre utilizzando un metodo statistico i pesi vengono attribuiti oggettivamente.

Strutture tettoniche

Le relazioni tra frane e strutture tettoniche sono state ampiamente studiate (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996; Parise et al., 1997; Gupta, 2005) e, pertanto, può essere considerato uno dei principali fattori che predispongono un versante a franare sia per la forte energia del rilievo, che in molti casi creano, sia per la l'enorme stato di fratturazione e successiva alterazione che producono sulle rocce coinvolte, che ne condizionano le caratteristiche meccaniche. Infatti, le fasce di fratturazione d'origine tettonica, spesso, rappresentano la sede preferenziale d'infiltrazione delle acque meteoriche in profondità che, favorendo i processi d'alterazione, predispongono i litotipi al dissesto per diminuzione della resistenza al taglio degli stessi.

I principali lineamenti tettonici di un'area (sovrascorrimenti, faglie dirette, inverse e trascorrenti) vengono ricavati dalla cartografia geologica esistente ed integrati dal lavoro sul terreno e dall'analisi di foto aeree e immagini satellitari. Successivamente, creato un *geo-database* in ambiente GIS, per valutare l'influenza della tettonica sulla distribuzione dei movimenti in massa all'interno di un'area, vengono creati dei *buffering* (zone di rispetto) per ogni faglia, con distanze crescenti rispetto ad ogni struttura tettonica (Fig.30a), ed all'interno di ogni zona di rispetto viene valutata l'area interessata da frana e di conseguenza il peso delle faglie nel predisporre un versante a franare (Conforti et al., 2011; Conforti et al., 2012).

Reticolo idrografico

Le linee di deflusso idrico superficiale possono avere un importante controllo sia sulla stabilità di un versante che sul grado di saturazione del terreno lungo il pendio (Saha et al., 2002; Cevik & Topal, 2003; Yalcin, 2008). Esse, infatti, sono in grado di creare situazioni destabilizzanti attraverso processi di erosione al piede dei versanti e/o di corpi di frana relitti, o incrementare la presenza di acqua nel terreno, che a sua volta può essere la causa innescante di un fenomeno franoso.

Per valutare l'influenza del reticolo idrografico sulla distribuzione dei movimenti in massa all'interno dell'area di studio vengono digitalizzate in ambiente GIS, in forma vettoriale, tutte le aste fluviali riportate sia sulle carte topografiche che riconosciute da foto aeree; per ogni asta fluviale, vengono creati dei *buffering* (zone di rispetto), con distanze crescenti a partire dai corsi d'acqua (Fig.30b), ed all'interno di ogni zona di rispetto viene valutata l'area in frane.

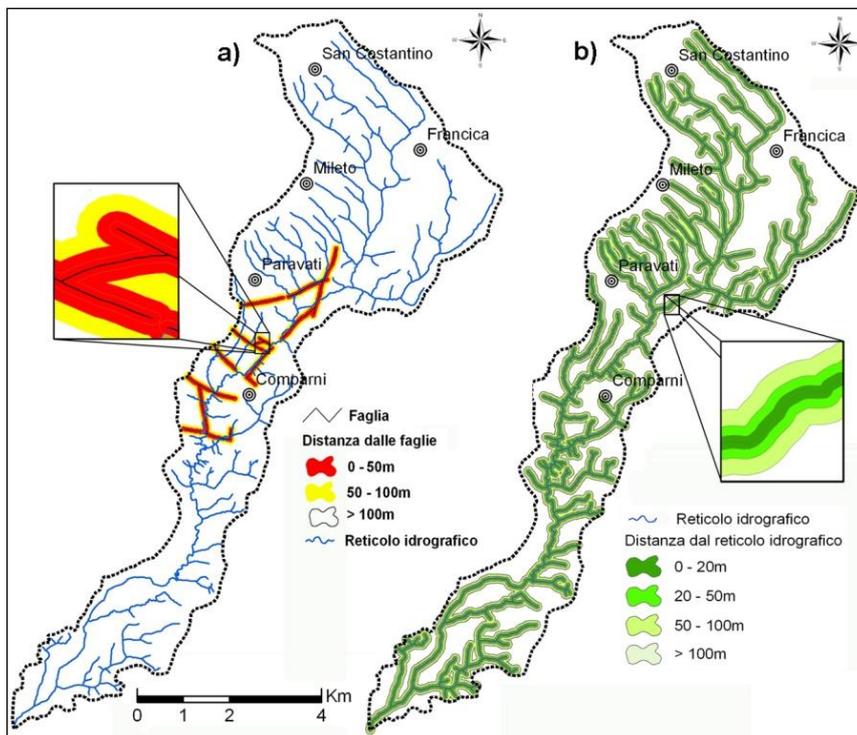


Figura 30 - Es. a) Carta delle distanze dalle faglie; b) Carta delle distanze dal reticolo idrografico (da Conforti et al., 2011 modificato).

Uso del suolo

L'uso del suolo e la copertura vegetale (Fig. 31), hanno una notevole influenza sulla stabilità di un versante, contrastando l'azione disgregatrice degli agenti atmosferici di tipo meccanico ed idrologico. In generale la presenza di una folta copertura arborea è favorevole alla sua stabilità perché attenua l'azione erosiva delle acque dilavanti, se si considerano frane la cui superficie di scivolamento non è più profonda degli apparati radicali; può, invece, causare instabilità se la superficie di scorrimento è più profonda rispetto alle radici degli alberi (Anbalagan 1992; Pachauri & Pant, 1992; Nagarajan et al., 2000). Un terreno denudato e/o con scarsa vegetazione, al contrario, è più soggetto alla degradazione e all'erosione da parte degli agenti atmosferici e pertanto più suscettibile all'insacco di frane.

La qualità e la quantità della copertura vegetale assumono un ruolo cruciale riguardo agli agenti di erosione: ad esempio è riconosciuto il contributo fondamentale di un bosco misto e multistrato nella protezione del suolo e nel controllo del ruscellamento idrico superficiale, a parità degli altri fattori predisponenti. Aree naturali e seminativi abbandonati intervallati da zone agrarie produttive aumentano, invece, la possibilità di mitigazione del rischio attraverso una corretta gestione ed un uso adeguato del territorio. I diversi tipi di utilizzo del suolo comportano un diverso grado di impedimento, o impedenza, nei confronti dell'erosione e/o degradazione dei suoli e sui fenomeni di instabilità geomorfologica in genere. In particolare l'efficacia della vegetazione nella protezione idrogeologica dipende dalla composizione, dalla struttura, dalla densità e dalle forme di gestione e diminuisce significativamente quando intervenga una degradazione del bosco per cause naturali, di cattiva gestione o indotta dagli incendi. Il passaggio del fuoco, oltre ai danni alla vegetazione con riduzione della funzione protettiva, determina fenomeni di alterazione chimico-fisica del suolo, diminuzione della capacità di infiltrazione, riduzione dei tempi di corruzione e processi di erosione idrica accelerata. Le aree acclivi percorse da incendio presentano un'elevata propensione al dissesto, che si manifesta con insacco di frane superficiali soprattutto in concomitanza di precipitazioni particolarmente intense. Nella compilazione della carta dell'utilizzazione reale del suolo, l'utilizzo di foto aeree e di immagini telerilevate forniscono un valido aiuto, coadiuvata da controlli sul terreno, per il riconoscimento delle diverse tipologie di uso e copertura del suolo.

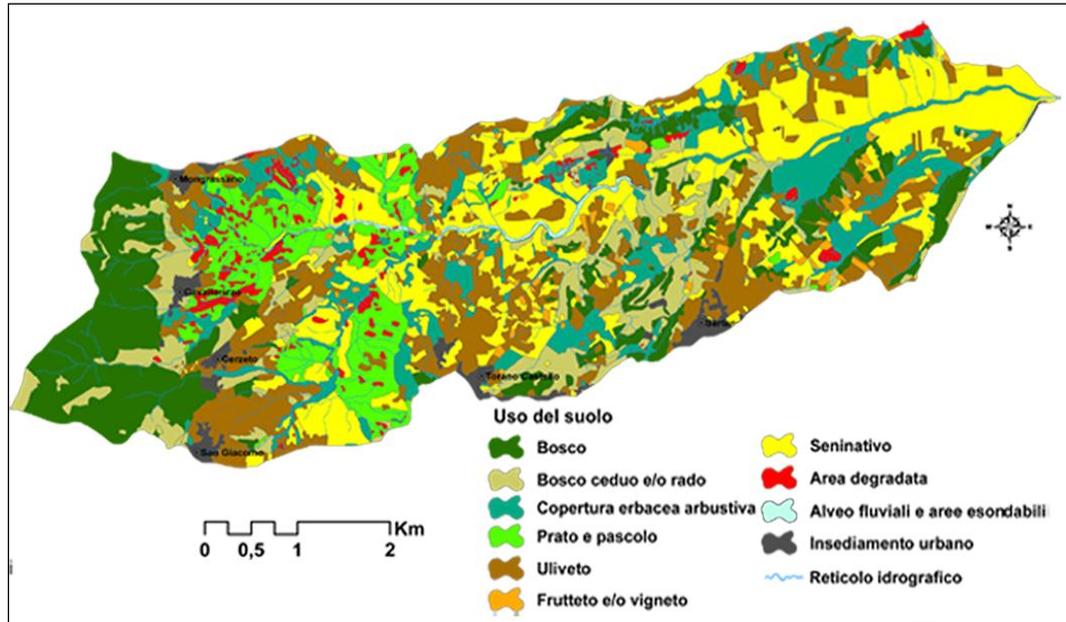


Figura 31 - Esempio di carta di uso del suolo (da Conforti, 2009 modificato).

Pendenza dei versanti

L'acclività è un fattore di primaria importanza nella dinamica dei processi che regolano l'evoluzione dei versanti (Fig.32); infatti essa condiziona il deflusso superficiale, la densità di drenaggio, l'erosione del suolo, ecc. (Dramis & Gentili, 1977). Per questa ragione la pendenza dei versanti gioca un ruolo determinante nella preparazione della carta della suscettibilità di un processo erosivo in un dato territorio, nel caso specifico da frana (Anbalagan, 1992; Pachauri et al., 1998; Clerici et al., 2002; Lee & Min, 2001; Saha et al., 2002; Cevik & Topal, 2003; Lee, 2005; Yalcin, 2007). Lucini (1969) ha proposto un metodo per ricavare soglie clivometriche per la zonazione della stabilità dei versanti analizzando le relazioni fra l'acclività del versante e la presenza di frane in atto entro domini litologici omogenei. Tale metodo è stato criticato, soprattutto dai geomorfologi, sulla base dell'evidenza che l'instabilità dei versanti non aumenta al crescere della pendenza. Piuttosto, nell'ambito di un'unità litologica omogenea, si può riscontrare statisticamente un intervallo clivometrico entro cui si ha la massima incidenza delle frane. Tale evidenza, seppur riconosciuta in una serie di lavori di geomorfologia applicata, è però contraddetta su base geotecnica: tranne che per meccanismi di rottura molto particolari, il fattore di sicurezza di un pendio

diminuisce monotonamente all'aumentare dell'acclività. L'anomalia riscontrata nelle analisi geomorfologiche è da imputare soprattutto a due fattori: i) una inadeguata definizione dei domini litologici omogenei, che dovrebbero essere definiti non tanto sulla base di criteri litostratigrafici bensì rigorosamente su base litotecnica (Casagli & Canuti, 1996) e ii) il fatto che la minore frequenza di frane ad elevate pendenze deriva in parte dalla scarsità di materiali di copertura presenti in aree ad alta energia del rilievo.

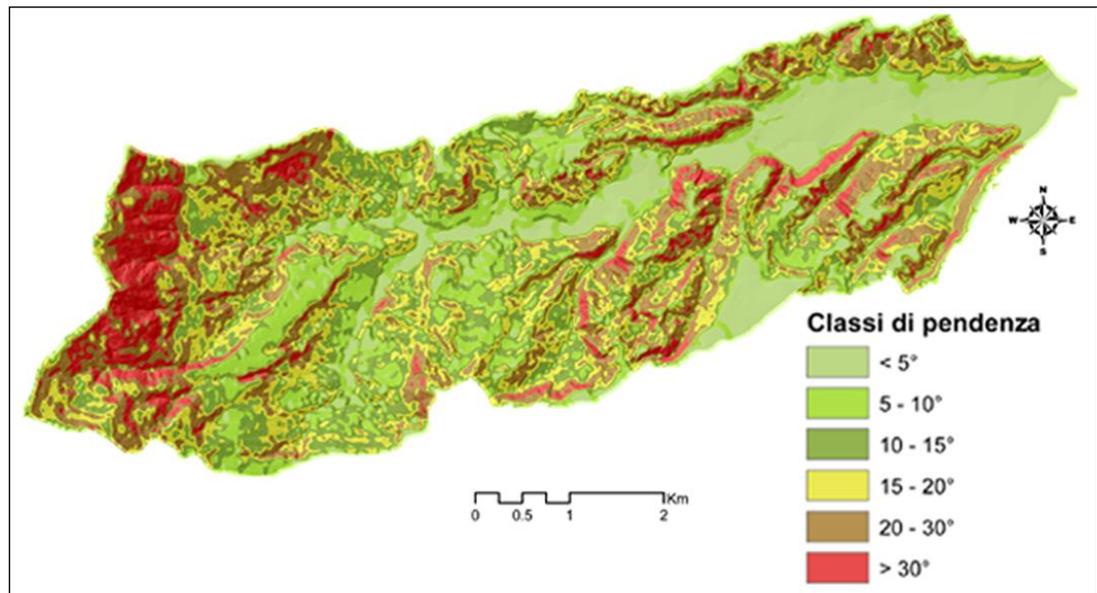


Figura 32 - Esempio di carta delle pendenze dei versanti (da Conforti, 2009 modificato).

Esposizione dei versanti

L'esposizione dei versanti è considerata un fattore morfometrico molto importante per il controllo dei processi di erosione e dell'innescio di frane.

L'esposizione dei versanti, influenzando il microclima attraverso l'angolo e la durata di incidenza dei raggi solari sulla superficie di un versante, può determinare condizioni chimiche e/o meccaniche particolari, favorendo l'alterazione delle rocce e la formazione di coperture e suoli e, pertanto, predisporre a fenomeni di instabilità i versanti. Ad esempio, nelle aree dove affiorano sedimenti argillosi i versanti esposti a sud risentono dell'alternanza stagionale dei periodi secchi ed umidi che svolgono un'azione combinata di degradazione e, in molti casi favoriscono i processi di erosione idrica;

contrariamente i versanti esposti a nord restano più umidi e di conseguenza possono favorire l'innescio di frane. La carta dell'esposizione dei versanti (Fig.33) viene estrapolata dal DTM ed i relativi valori vengono suddivisi in 9 classi, 8 delle quali secondo i punti cardinali ed una relativa alle superfici sub-pianeggianti.

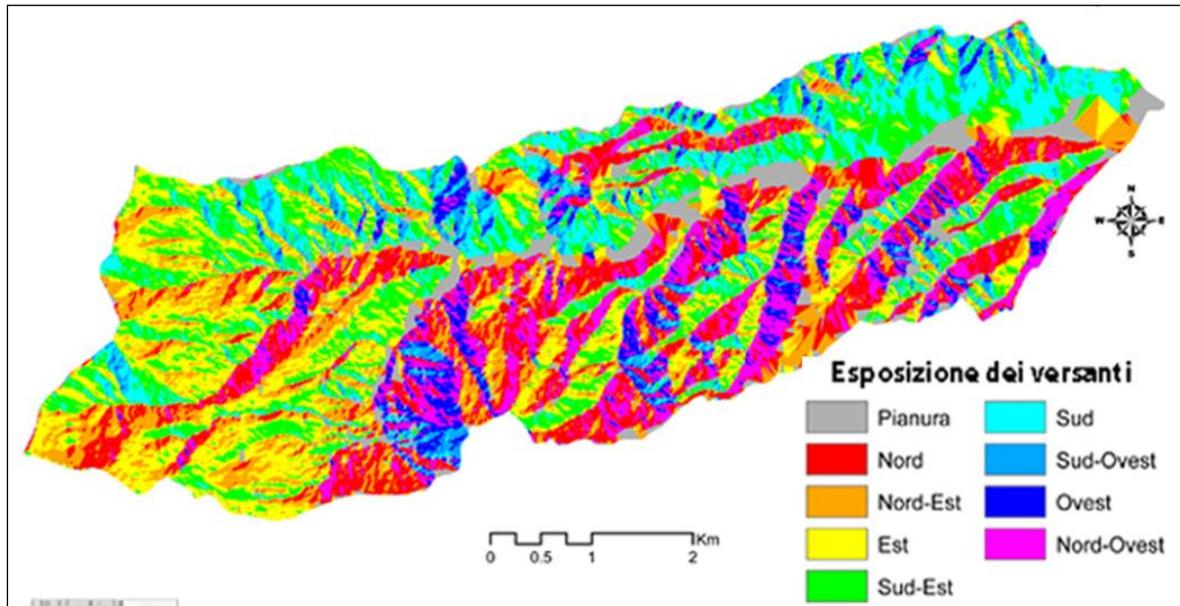


Figura 33 - Esempio di carta dell'esposizione dei versanti (da Conforti, 2009 modificato).

Curvatura dei versanti

La curvatura, in generale, rappresenta la variazione della pendenza nello spazio e si esprime come gradiente della pendenza. Questo parametro è importante per determinare la divergenza o la convergenza del deflusso idrico. La curvatura planare dei versanti, ricavata dal un DTM, è data dalla derivata seconda della curva generata dall'intersezione della superficie topografica con il piano verticale tangente alle curve di livello (Fig.33a); essa esprime la curvatura convessa o concava dei versanti con valori, rispettivamente, positivi e negativi. Per valori intorno allo zero la curvatura del versante si considera piana (Wilson & Gallant, 2000).

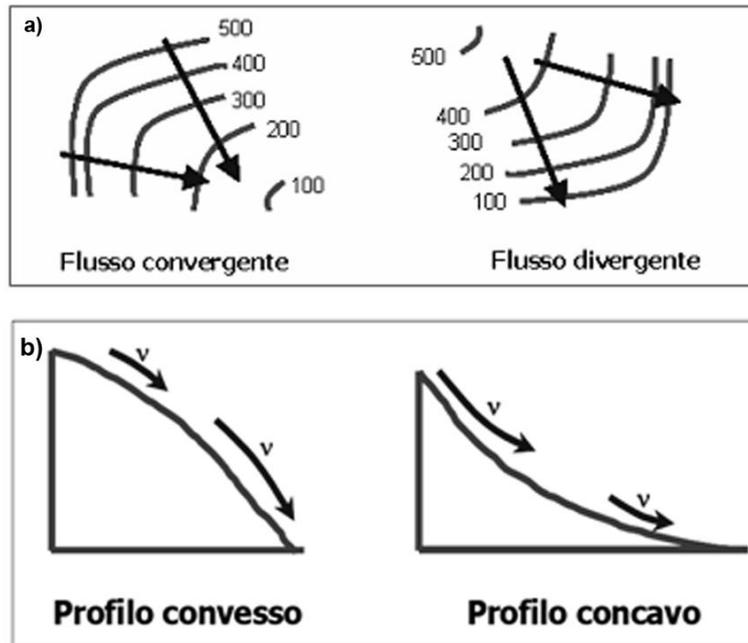


Figura 33 - a) Curvatura planare: divergenza e convergenza del flusso in base alla disposizione delle isoipse; b) Curvatura di profilo.

L'analisi della curvatura di profilo indica se un qualsiasi punto lungo il profilo appartiene ad un'area concava o convessa: la curvatura di profilo è convessa quando in pianta le curve di livello si avvicinano e concava quando le curve di livello si allontanano oppure, in sezione longitudinale, convessa se la pendenza aumenta verso valle e concava nel caso opposto (Fig.33b).

Stream power index (SPI)

Il fattore SPI (Fig.34a) indica il potere erosivo del flusso idrico in ogni cella del *grid*; esso viene definito utilizzando l'espressione proposta da Moore et al., (1991):

$$SPI = A_s \times \tan \sigma$$

dove A_s (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e σ rappresenta la pendenza espressa in gradi. Il parametro SPI, in generale, è fortemente correlato con le linee di imprevio, dove raggiunge i valori più elevati.

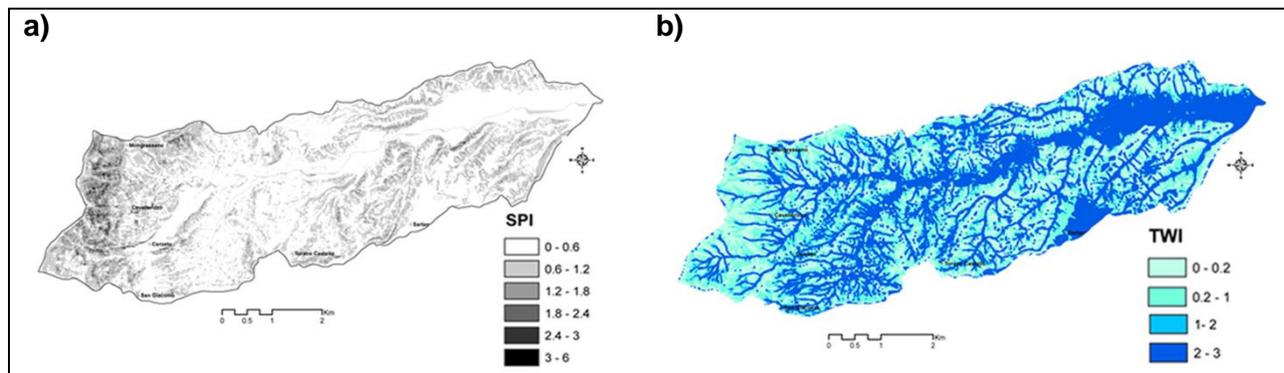


Figura 34 - a) Carta dello SPI; b) Carta del TWI (da Conforti, 2009 modificato).

Topographic Wetness Index (TWI)

Il parametro TWI (Fig.34b) indica la capacità di infiltrazione delle acque di ruscellamento di un'area in base alle differenti condizioni topografiche (Moore et al., 1991); la quantità d'acqua che può infiltrarsi, differenziando dunque le celle nelle quali è suddiviso il versante, in funzione del grado di umidità o saturazione potenziale. La presenza di acqua influenza direttamente la stabilità dei terreni, poiché da una parte ne aumenta il peso di volume, dall'altra, modifica significativamente le resistenze disponibili su terreni a comportamento pseudo-coerente. Esso è definito dalla seguente espressione:

$$TWI = \ln (As / \tan \sigma)$$

dove As (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e σ rappresenta la pendenza espressa in gradi. I due parametri appena descritti sono calcolati dal DTM, utilizzando un *software* GIS (O'Callaghan & Mark, 1984).

1.1.3.3.2 Metodo di analisi statistica per la valutazione della suscettibilità

Per la valutazione della suscettibilità da frana verrà utilizzato un metodo di statistica multivariata denominato "Analisi Condizionale", implementato in ambiente GIS (Fig.35).

Il metodo si basa sulle unità di condizioni uniche (UCU) e rientra nella categoria dei metodi di analisi probabilistica condizionale (Carrara et al., 1995; Clerici et al., 2002).

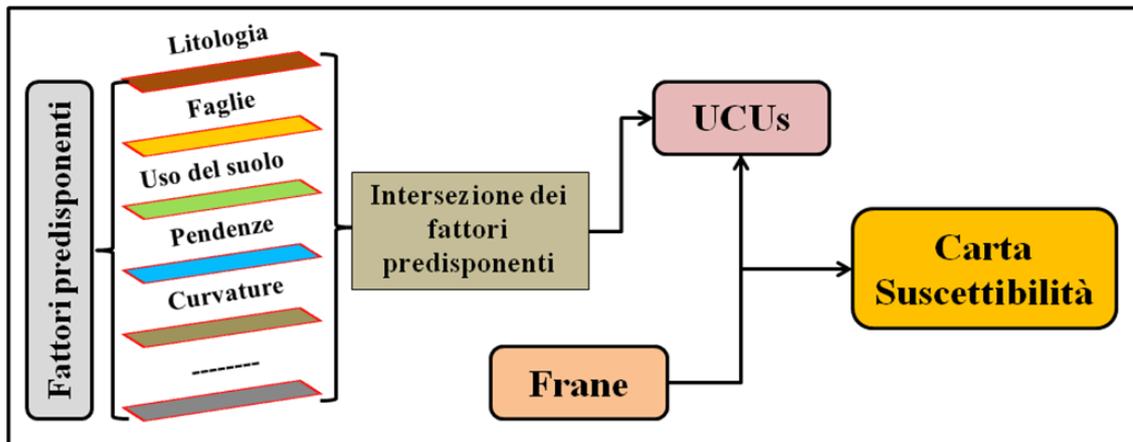


Figura 35 - Schema del modello di analisi per la valutazione della suscettibilità da frana.

La scelta delle UCU comporta la classificazione dei fattori predisponenti, organizzati ciascuno in un livello informativo (*layer*) a se stante, in un numero limitato di classi. Una volta definiti i *layers* tematici da utilizzare nell'analisi di suscettibilità, essi verranno trasformati in formato *raster*. La sovrapposizione dei diversi *rasters*, ottenuta in ambiente GIS, applicando tecniche di analisi spaziale unitamente ad operazioni di algebra di mappa, porta alla definizione dei domini omogenei (UCU), caratterizzati da combinazioni uniche delle classi in cui i fattori predisponenti sono stati suddivisi (Hansen, 1984; Falaschi et al., 2007). Si produrrà dunque una carta rappresentante la distribuzione spaziale delle UCU (Fig.36), con una tabella associata che conterrà tutte le combinazioni tra i fattori predisponenti, un esempio è riportato in Tabella 25.

Il numero di UCU, contenuti nel relativo *layer*, dipende dal numero delle classi che sono state individuate per ciascuno dei fattori predisponenti considerati. Infatti, il numero massimo di UCU è dato dal prodotto del numero delle classi di ciascun fattore considerato, come espresso dalla seguente relazione:

$$N_{max} = N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n$$

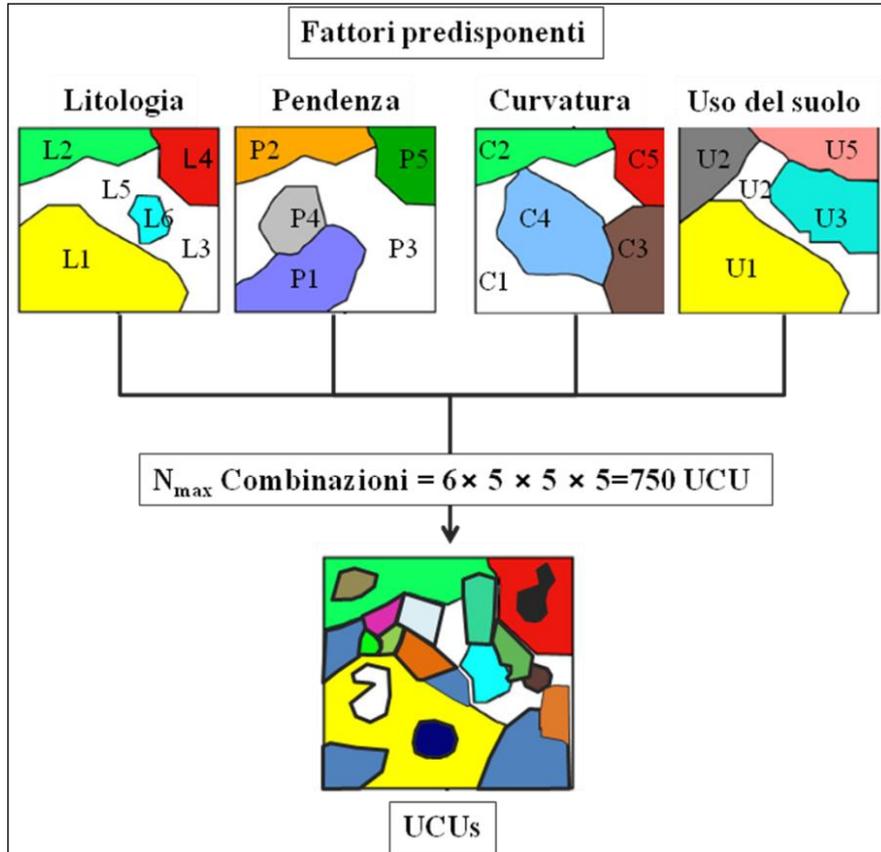


Figura 36 - Schema del procedimento per la definizione delle UCUs.

N. UCU	N. Pixels	Fattori predisponenti			
		Litologia	Pendenza	Curvatura	Esposizione
212	677	Argille	20-30°	Concava	N
325	778	Sabbie	10-20°	Convessa	E
123	233	Arenarie	10-20°	Planare	S
107	499	Conglomerati	20-30°	Convessa	E
331	123	Conglomerati	0-10°	Planare	O
645	567	Gneiss	20-30°	Concava	N

Tabella 25 - Esempio di possibili combinazioni di UCU.

Dalla sovrapposizione del *layer* delle UCU con quello delle frane si otterrà la densità di frana in ciascuna UCU (rapporto percentuale tra l'area in frana in ciascuna UCU e l'area della UCU) che rappresenta il grado di propensione al dissesto del territorio secondo quanto espresso nell'assunto di Bayes (Morgan B.W., 1968). Infatti dal punto di vista formale la probabilità condizionata è data da:

$$P(f | UCU) = \text{area in frana/area UCU}$$

dove $P(f | UCU)$ rappresenta la probabilità (P) di frana (f) data una certa combinazione dei fattori predisponenti (UCU).

La distribuzione della densità di frana in ciascuna UCU verrà suddivisa in quattro classi a cui corrisponderà un diverso livello di suscettibilità da frana (**SF**): bassa (**SF1**), moderata (**SF2**), alta (**SF3**) e molto alta (**SF4**) (Tab. 26).

Suscettibilità da frana	Colore	Valore RGB
 Bassa	Verde	R= 56; G= 168; B= 0
 Moderata	Giallo	R= 255; G= 255; B= 0
 Alta	Arancione	R= 255; G= 85; B= 0
 Molto alta	Rosso	R= 255; G= 0; B= 0

Tabella 26 - Legenda da utilizzare per la redazione della carta della suscettibilità da frana.

Al fine di rendere più oggettiva possibile l'individuazione dei valori soglia delle classi di pericolosità potenziale da frana, in cui suddividere il territorio, verrà utilizzato un sistema di classificazione automatico del *software* GIS usando l'algoritmo *Jenks*.

Dall'intersezione tra carta delle frane, distinte per tipologia di movimento, e la carta delle UCU si otterrà una carta della suscettibilità per ogni tipologia di frana, così facendo si otterranno diversi scenari di pericolosità potenziale da frana.

Per stimare l'accuratezza delle carte di suscettibilità ottenute e conseguentemente la validità del modello utilizzato, il *dataset* di frane cartografate verrà suddiviso in due gruppi sufficientemente rappresentativi dell'area di studio, della distribuzione e della tipologia di frane censite. Un primo

gruppo (*training set*), sarà utilizzato per costruire il modello di suscettibilità con il metodo statistico illustrato in precedenza, mentre il secondo gruppo (*validation set*) sarà impiegato per valutare la capacità previsionale del modello, verificando la percentuale di frane che ricadono nelle diverse classi di suscettibilità. I metodi che si possono utilizzare per suddividere il *database* delle frane censite, tenendo conto delle caratteristiche dei dati disponibili, possono essere: una suddivisione temporale, *random* o spaziale (Chung & Fabbri, 2003).

La validazione verrà fatta tramite la realizzazione e l'analisi di due curve: la *prediction-rate* e la *success-rate* (Chung & Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003). La curva *prediction-rate* si realizza riportando sull'asse delle ascisse di un grafico binario l'area cumulata dei valori di suscettibilità, espressa in percentuale, a partire da quella con i valori più elevati, mentre sull'asse delle ordinate la percentuale cumulata delle frane del *validation set* (non utilizzate nell'analisi) che ricadono nelle rispettive classi di suscettibilità (Fig.46).

La forma della curva *prediction-rate* esprime il tipo di correlazione fra la carta di suscettibilità (derivata con le frane del *training set*) e la distribuzione spaziale delle frane del *validation set*. Una tendenza diagonale della curva implica una predizione totalmente casuale (Conoscenti et al., 2008). Pertanto, più la curva si allontana dalla diagonale e più è ripida nella parte iniziale tanto maggiore sarà la capacità predittiva del modello (Chung & Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003). Inoltre calcolando l'area sottesa dalla curva (AUC) è possibile valutare la percentuale di predizione del modello.

La curva *success-rate* è ottenuta seguendo la stessa procedura, con la differenza che sull'asse delle ordinate si riportano le frane del *training set*. Questa curva definisce la capacità del metodo utilizzato nel classificare correttamente le frane utilizzate per stimare la suscettibilità e ci permette di valutare la bontà (*goodness of fit*) del modello predittivo (Chung & Fabbri, 2003).

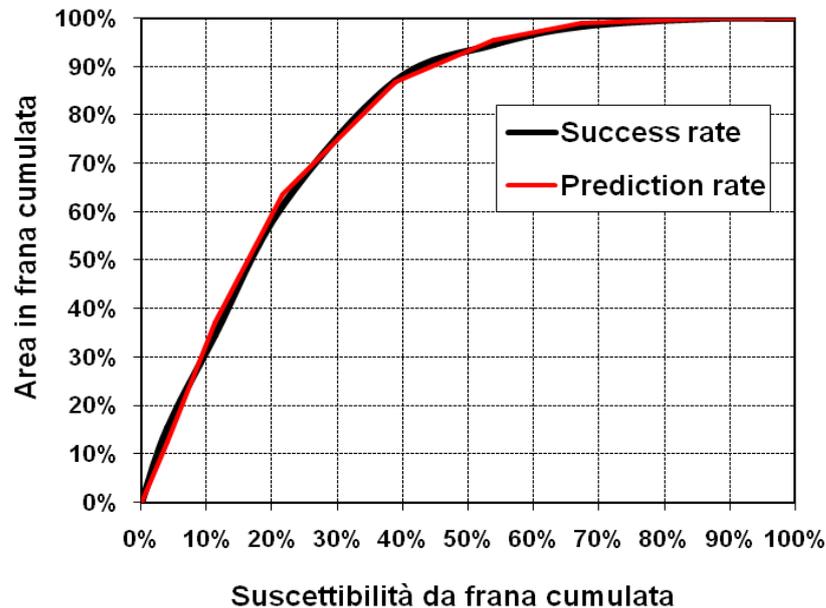


Figura 37 - Esempio di curva success rate e curva prediction rate.

> 1.1.3.3.3 Valutazione del danno potenziale

La vulnerabilità (V) rappresenta la probabilità che un elemento a rischio (E) subisca un danno (D) al verificarsi di una frana di intensità nota:

$$V = f(E, D)$$

Quindi, per analizzare le conseguenze che una frana può determinare sugli elementi a rischio di un dato territorio, nel caso specifico nei tre tratti di rete autostradale oggetto di studio, c'è bisogno di stimare la vulnerabilità di tali elementi, o meglio il grado di perdita o danno atteso nel caso si verifichi un fenomeno franoso avente una determinata intensità.

Un primo passo per valutare la vulnerabilità nel presente lavoro è stato quello di stabilire delle classi di danno potenziale. Il danno potenziale è funzione della vulnerabilità ed è indipendente dalla pericolosità. Esso esprime l'aliquota del valore dell'elemento a rischio che può venire compromesso in seguito al verificarsi di una frana di una certa intensità.

In questo studio, per stimare la vulnerabilità, si prenderanno in considerazione le relazioni esistenti tra la velocità di spostamento, stimata in base al tipo di

movimento franoso (Tab.27), l'intensità della frana e il danno atteso, mediante una matrice di correlazione che consente di assegnare al tratto di autostrada un determinato livello di danno potenziale.

La matrice, riportata in Tabella 27, è stata preparata prendendo spunto dai lavori di Leone (1996), Wong et al. (1997), Fell (2000), Iovine & Parise (2002) e Cardinali et al. (2002).

L'approccio è di tipo qualitativo e ipotizza quattro differenti tipologie di danno potenziale sul tratto autostradale a seguito dell'innescarsi di un fenomeno franoso:

- *Danno lieve (D1)*: presenza di piccole lesioni (inferiori al centimetro) sul manto stradale; la funzionalità e la stabilità della strada non sono compromesse. Questa tipologia di lesioni può essere causata anche da altri processi, quali vibrazioni o assestamenti e cedimenti strutturali.
- *Danno moderato (D2)*: presenza di fessure centimetriche sulla strada e su eventuali muri di contenimento; la stabilità non è compromessa ed i danni possono essere riparati velocemente, le riparazioni non sono urgenti.
- *Danno elevato (D3)*: deformazioni e lesioni sul manto stradale importanti e su i muri di sostegno presenti. La funzionalità e la stabilità della strada risultano compromesse e le riparazioni sono indispensabili.
- *Danno molto elevato (D4)*: distruzione parziale o totale della strada e la viabilità viene interrotta.

Per quanto riguarda le persone, il danno potenziale viene suddiviso in:

- *Danni diretti*: nel caso in cui siano previsti morti e/o feriti.
- *Danni indiretti*: nel caso in cui si prevedano effetti negativi di tipo socio-economico: limitazioni allo stile di vita, impossibilità a raggiungere il luogo di lavoro, le scuole o gli ospedali.

Intensità (I)	Tipo e velocità di movimento	Danni Potenziali		
		Autostrada	Persone	
			Diretti	Indiretti
Molto alta	V3	D4	Si	Si
	V2	D4	Si	Si
	V1	D4	Si	Si
Alta	V3	D4	Si	Si
	V2	D4	Si	Si
	V1	D3	No	Si
Moderata	V3	D3	Si	Si
	V2	D3	Si	Si
	V1	D2	No	No
Bassa	V3	D3	Si	Si
	V2	D2	Si	No
	V1	D1	No	No
Molto bassa	V3	D2	Si	No
	V2	D1	No	No
	V1	D1	No	No

Tabella 27 - Tipo di danno potenziale in relazione al tipo di movimento franoso e alla sua intensità. D1= danno lieve; D2= danno moderato; D3= danno elevato; D4= danno molto elevato; V1=velocità bassa; V2=velocità media V3=velocità alta.

Dalla Tabella 27 si osserva come le frane a cinematismo veloce (**V3**) hanno sempre un'influenza diretta sulle persone; infatti, anche il crollo di un blocco di roccia di dimensioni modeste potrebbe avere conseguenze gravi, se, cadendo su una strada, colpisse un'auto in transito. Le frane più lente (**V1**), invece, hanno effetti diretti solo in occasione di movimenti che coinvolgono grossi quantitativi di materiale. Per la strada i danni elevati e molto elevati sono sempre legati ai movimenti veloci ed ha frane con intensità alta e molto alta, anche in virtù del fatto che i movimenti lenti possono invece essere affrontati con una serie di lavori di rinforzo e messa in sicurezza durante il movimento stesso.

In particolare, una colata detritica, con velocità di movimento (V_2), che invade una strada, è relazionata ad un danno potenziale almeno moderato, poiché invadendo la carreggiata può ostacolare la circolazione dei veicoli.

> 1.1.3.3.4 Valutazione del rischio potenziale da frana

Il rischio esprime il valore del danno atteso sugli elementi vulnerabili al verificarsi di un evento franoso di data pericolosità. Una stima del rischio connesso ad un evento franoso richiede la conoscenza sia della probabilità che si verifichi l'evento franoso sia del tipo di conseguenze che esso avrà sul territorio. È evidente che in assenza di elementi esposti il danno e il relativo rischio sono nulli.

Il rischio potenziale viene stimato attraverso l'intersezione della carta del danno potenziale con la carta della pericolosità spaziale da frana (susceptibilità da frana) calcolata per ogni tipologia di frana (Fig.38).

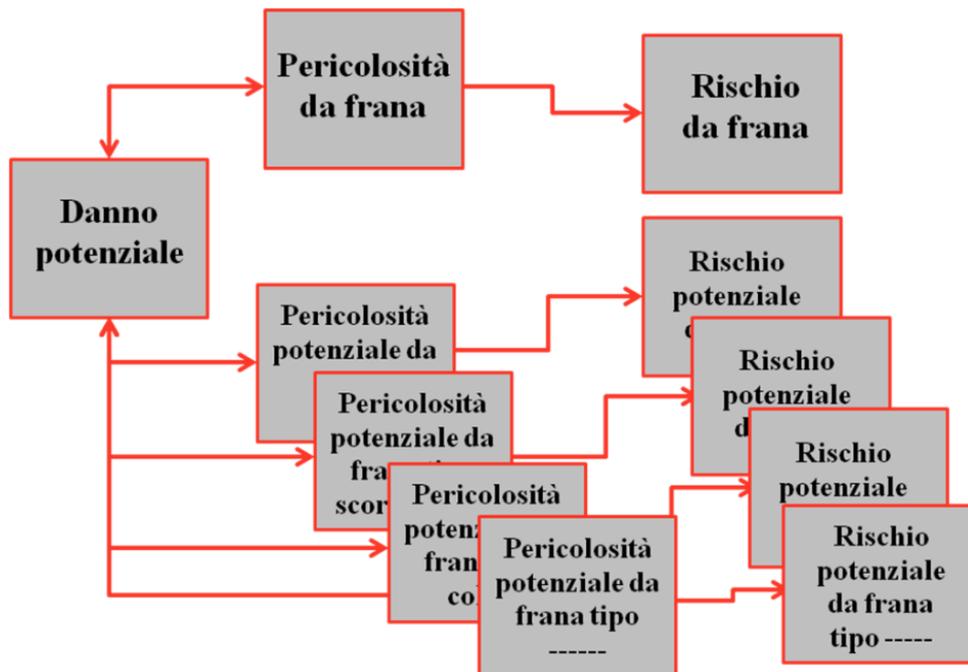


Figura 38 - Procedura adottata per la definizione del rischio potenziale da frana.

Questo permetterà di ottenere uno scenario di rischio potenziale e di conseguenza una carta di rischio per ogni tipo di movimento franoso.

La sovrapposizione tra le due carte porta a definire i diversi livelli di rischio e di conseguenza differenti scenari, attraverso l'applicazione di una matrice che mette in relazione la pericolosità potenziale da frana (susceptibilità) e il danno potenziale (Tab.28). Il rischio potenziale da frana può essere suddiviso in quattro livelli:

- *Rischio potenziale basso (Rp1)*: rischio potenziale incombente su aree con classi di susceptibilità **Pp2** a **Pp1**; con danno potenziale che varia da elevato a lieve.
- *Rischio potenziale moderato (Rp2)*: rischio potenziale incombente su aree con classi di susceptibilità da frana **Pp3** a **Pp2**, con danno potenziale da molto elevato a lieve.
- *Rischio potenziale alto (Rp3)*: rischio potenziale incombente su aree a susceptibilità da frana con classi che variano da **Pp4** a **Pp2**, con esposizione potenziale del danno da molto elevato a lieve e problemi per l'incolumità delle persone.
- *Rischio potenziale molto alto (Rp4)*: rischio potenziale incombente su aree a susceptibilità da frana ricadenti nelle classi **Pp4** e **Pp3**, con esposizione a un danno potenziale elevato e molto elevato. È possibile, in caso si verifichi una frana la perdita e/o il ferimento delle persone.

Danno potenziale	Pericolosità (H)			
	Pp4	Pp3	Pp2	Pp1
D4	Rp4	Rp4	Rp3	Rp2
D3	Rp4	Rp3	Rp2	Rp2
D2	Rp3	Rp3	Rp2	Rp1
D1	Rp3	Rp2	Rp1	Rp1

Tabella 28 - Determinazione delle classi di rischio potenziale (Rp) sulla base della susceptibilità da frana e del danno potenziale (D).

> 1.1.3.3.5 Scenari di evento

Gli scenari di evento descrivono le caratteristiche dei fenomeni franosi attesi in termini di severità geometrica (superficie, volume, spessore, ecc.), velocità, materiali coinvolti e probabilità di accadimento (tempo di ritorno). L'applicazione degli scenari di evento può essere riferita ad una singola frana o ad un tratto di versante, identificato come UG (Unità Geomorfologica), che può essere interessato da uno o più fenomeni franosi.

Nel caso specifico, per la valutazione degli scenari di evento si partirà da un approccio di tipo geomorfologico che permetterà la caratterizzazione dettagliata delle frane. Per ogni frana cartografata si dovranno fornire tutte le informazioni riportate nella tabella sottostante (Tab.29):

Campo	Contenuto
Codice	Progressivo numerico identificativo unico dell'evento
Tipologia	Indicazione del tipo di movimento franoso
Attività	Indicazione dello stato di attività della frana
Area	Superficie interessata dal dissesto espressa in m ²
Profondità	Stima dello spessore dell'ammasso spostato
Volume	Stima del volume del materiale coinvolto nel movimento
Corona	Lunghezza della corona
Fronte della frana	Lunghezza del fronte della frana
Intensità	Stima dell'intensità della frana
Velocità	Stima della velocità della frana
Frequenza	Stima della frequenza probabile della frana

Tabella 29 - Dati da riportare nel database delle frane inventariate per la stima degli scenari di evento.

L'analisi degli scenari di evento consentirà di stimare l'intensità e la probabilità di accadimento degli eventi franosi, che, attraverso l'uso di matrici d'interazione codificate, permette la definizione di diversi scenari.

In maniera più dettagliata si possono individuare le seguenti fasi che porteranno a definire la pericolosità da frana e di conseguenza alla realizzazione degli scenari di evento:

- Definizione dell'**indice di severità geometrica** (grandezza) della frana;
- Definizione della **velocità** della frana;
- Definizione dell'**intensità della frana**;
- Definizione della **probabilità di accadimento** (tempo di ritorno).

Definizione dell'indice di severità geometrica della frana

L'indice di severità geometrica (ISG) di una determinata frana viene valutato in maniera differente a seconda del tipo di movimento. Per gli scivolamenti senso lato, le colate di detrito e/o di terra, le frane complesse e gli scivolamenti in roccia, l'indice di severità geometrica verrà stimato sulla base della superficie della frana (SUP), della lunghezza della corona (COR), del fronte della frana (FRO), dello spessore (SPE) e del volume di materiale coinvolto nel movimento (VOL) (Fig.39). Per le frane in roccia (crolli e/o ribaltamenti) si procederà ad una valutazione delle dimensioni dei blocchi caduti o potenzialmente mobilizzabili (DIM).

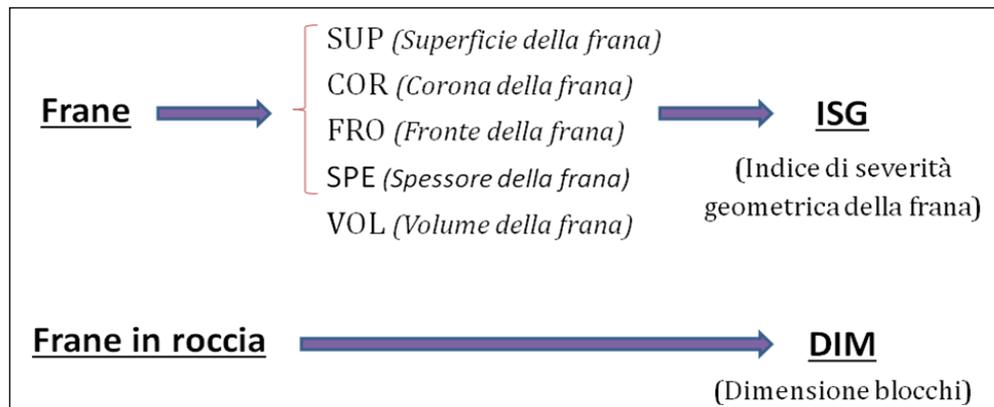


Figura 39 - Informazioni necessarie per la definizione dell'indice di severità geometrica di una frana.

I parametri (SUP, COR, FRO, SPE e VOL) scelti per definire l'indice di severità geometrica sono stati suddivisi, ognuno in cinque classi, le quali vengono di seguito riportate (Tabelle 30, 31, 32, 33, 34):

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto piccola	< 100 m ²
2	piccola	<1.000 m ²
3	media	<10.000 m ²
4	grande	<100.000 m ²
5	molto grande	>100.000 m ²

Tabella 30 - Classi della superficie in frana (SUP).

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto piccola	<10 m
2	piccola	< 100 m
3	media	< 500 m
4	lunga	< 1000 m
5	molto lunga	>1000 m

Tabella 31 - Classi della corona di frana (COR).

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto piccolo	<10 m
2	piccolo	< 100 m
3	medio	< 500 m
4	lungo	< 1000 m
5	molto lungo	>1000 m

Tabella 32 - Classi del fronte di frana (FRO).

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto superficiale	≤ 0.5 m
2	superficiale	≤ 2 m
3	media	≤ 10 m
4	profonda	≤ 30 m
5	molto profonda	> 30 m

Tabella 33 - Classi degli spessori della frana (SPE).

Classe	Denominazione	Descrizione
1	estremamente piccola	< 500 m ³ ; classe estr. piccola Fell (1994)
2	molto piccola	< 5.000 m ³ ; classe molto piccola Fell (1994)
3	piccola	< 50.000 m ³ ; classe piccola Fell (1994)
4	media	< 500.000 m ³ ; classi media e mediamente grande (parte) Fell (1994)
5	grande	> 500.000 m ³ ; classi mediamente grande (parte), molto grande, estremamente grande Fell (1994)

Tabella 34 - Classi di volume (VOL).

Una volta determinati e suddivisi in classi i parametri si procede alla valutazione dell'indice di severità geometrica per ogni frana attraverso l'intersezione dei cinque parametri (SUP+COR+FRO+SPE+VOL). Tutte le operazioni di intersezione verranno effettuate tramite un sistema GIS. L'indice di severità geometrica verrà suddiviso in cinque classi che vanno da molto bassa a molto alta, come riportato in Tabella 35:

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto bassa	indici SUP, COR, FRO, SPE, VOL tutti eguali ad 1
2	bassa	almeno un valore 2 tra gli indici SUP, COR, FRO, SPE, VOL
3	media	almeno un valore 3 tra gli indici SUP, COR, FRO, SPE, VOL
4	alta	almeno un valore 4 tra gli indici SUP, COR, FRO, SPE, VOL
5	molto alta	almeno un valore 5 tra gli indici SUP, COR, FRO, SPE, VOL

Tabella 35 - Classi dell'indice di severità geometrica (ISG).

Nel caso di frane in roccia si considerano, invece, le dimensioni dei blocchi (DIM) caduti o potenzialmente mobilizzabili, come riportato nella Tabella 36.

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto piccolo	diametro \leq 0.5 m
2	piccolo	diametro \leq 2 m
3	medio	diametro \leq 5 m
4	grande	diametro \leq 10 m
5	molto grande	diametro $>$ 10 m

Tabella 36 - Classi per le dimensioni dei blocchi di roccia (DIM).

Definizione della velocità del movimento franoso

Per quanto concerne la velocità di movimento di una frana (VEL), viene stimata tenendo conto delle diverse tipologie di movimento della frana, facendo riferimento alla classificazione di Cruden & Varnes (1996). In particolare per la stima della velocità vengono individuate tre classi (Tab.37):

- movimenti a cinematica lenta e intensità bassa, ovvero scivolamenti rotazionali e planari, colamenti e espansioni laterali;
- movimenti a cinematica rapida e intensità media, ovvero colate di terra e di detrito e frane complesse;

- movimenti a cinematica veloce e intensità alta, ovvero crolli, ribaltamenti, scivolamenti in roccia e colate detritiche.

Classe	Denominazione	Descrizione
1	lento	Scorrimenti, colate, e espansioni laterali (<1m/anno)
2	moderato	Colate di terra e di detrito e frane complesse (1m/anno÷1m/ora)
3	rapido	Crolli e ribaltamenti, scivolamenti in roccia e colate detritiche (>1m/ora)

Tabella 37 - Classi di velocità dei fenomeni franosi (VEL).

Definizione dell'intensità della frana

L'intensità di una frana si riferisce a quei caratteri che descrivono qualitativamente o quantitativamente l'impatto dell'evento sul territorio. Il potere distruttivo di una frana, in prima analisi, è funzione sia della sua velocità sia del suo volume (dimensione), anche se nei piani di gestione della pericolosità e del rischio si considera principalmente la velocità, perché è intimamente correlata alla percezione che la popolazione esposta ha del fenomeno.

Nel caso specifico, sono considerate tre classi di intensità (Tab.38); per le frane *latu sensu* l'intensità (INF) è valutata combinando l'indice di severità geometrica (ISG) con la velocità dei fenomeni franosi cartografati (Tab.39). Nel caso di crolli e/o ribaltamenti per la stima dell'intensità (INR) si procederà alla combinazione delle dimensioni dei blocchi caduti con la velocità (Tab.40).

Classe	Denominazione
1	bassa
2	media
3	elevata

Tabella 38 - Classi di intensità.

	VEL1	VEL2	VEL3
ISG1	INF1	INF1	INF1
ISG2	INF1	INF1	INF2
ISG3	INF1	INF2	INF3*
ISG4	INF2	INF2*	INF3
ISG5	INF3*	INF3	INF3

Tabella 39 - Matrice dell'intensità per le frane lato sensu (* oppure INF2).

	VEL1	VEL2	VEL3
DIM1	-	-	INR1
DIM1	-	-	INR2
DIM1	-	-	INR3*
DIM1	-	-	INR3
DIM1	-	-	INR3

Tabella 40 - Matrice dell'intensità per frane in roccia (*oppure INR2).

Definizione della probabilità di accadimento

Per la definizione della probabilità di accadimento o tempo di ritorno di una frana, in questo studio la frequenza di un fenomeno franoso è stata valutata su base geomorfologica, con stime supportate da ricognizioni sul terreno e dall'analisi di foto aeree, ortofoto e immagini da satellite di anni diversi. Laddove disponibili, saranno utilizzate anche le informazioni derivanti da dati di monitoraggio, dati di bibliografia e ricerche su archivi storici.

Pertanto vengono identificate, cinque classi di probabilità di accadimento di un evento franoso (PRO), in base ai tempi di ritorno e allo stato di attività delle frane (Tab.41).

Classe	Denominazione	Descrizione
1	molto rara	T > 100 anni
2	rara	T < 100 anni
3	poco frequente	T < 50 anni
4	frequente	T < 5 anni
5	molto frequente	T < 1 anno

Tabella 41 - Classi di probabilità di accadimento di un evento franoso (PRO).

Valutazione della pericolosità

La pericolosità di una frana (HF) è definita come una funzione della sua intensità (INF) e dalla probabilità di accadimento di un evento franoso (PRO):

$$HF = INF \times PRO$$

Nel caso specifico la pericolosità da frana si calcolerà combinando i valori di intensità con quelli di probabilità di accadimento, utilizzando la Tabella 42. La pericolosità è suddivisa in quattro classi:

- **HF1** - Pericolosità bassa;
- **HF2** - Pericolosità moderata;
- **HF3** - Pericolosità alta;
- **HF4** - Pericolosità molto alta.

	INF1	INF2	INF3
PRO1	HF1	HF1	HF1
PRO2	HF1	HF2	HF2
PRO3	HF2	HF3	HF3
PRO4	HF3	HF3	HF4
PRO5	HF4	HF4	HF4

Tabella 42 - Matrice di interazione utilizzata per la valutazione della pericolosità da frana *latu sensu*.

La pericolosità di un evento franoso di tipo crollo e/o ribaltamento (HR) è definita come una funzione della sua intensità (INR) e dalla probabilità di accadimento (PRO):

$$HR = INR \times PRO$$

La pericolosità da frana di tipo crollo si calcolerà combinando i valori di intensità con quelli di probabilità di accadimento, utilizzando la Tabella 43. La pericolosità è suddivisa, anche in questo caso, in quattro classi:

- **HR1** - *Pericolosità bassa;*
- **HR2** - *Pericolosità moderata;*
- **HR3** - *Pericolosità alta;*
- **HR4** - *Pericolosità molto alta.*

	INR1	INR2	INR3
PRO1	HR1	HR1	HR1
PRO2	HR1	HR2	HR2
PRO3	HR2	HR3	HR3
PRO4	HR3	HR3	HR4
PRO5	HR4	HR4	HR4

Tabella 43 - Matrice di interazione utilizzata per la valutazione della pericolosità da frana di tipo crollo e/o ribaltamento.

1.1.3.3.5.1 Valutazione degli scenari di evento

La redazione della carta degli scenari di evento, che come detto in precedenza, rappresenta le caratteristiche dei fenomeni franosi in termini di severità geometrica, velocità, materiali coinvolti e probabilità di accadimento; nel caso specifico essi sono riferibili a singole UGM (Unità Geomorfologiche Monitorate) o a singole SubUGM.

La carta degli scenari di evento prevede la realizzazione tre livelli informativi: Livello 1, Livello 2 e Livello 3.

Nel primo livello si effettua la perimetrazione delle frane che rientrano all'interno dell'UG. Inoltre, per ogni frana si traccia una possibile zona di propagazione in quanto essa consente di individuare le aree che possono essere

interessate, direttamente o indirettamente, dal fenomeno franoso (Fig. 40). La zona di propagazione è da valutare con attenzione, soprattutto per quei tipi di fenomeni caratterizzati da elevata velocità e notevole distanza di espansione (ad esempio *debris flows* e/o frane da crollo). In generale, per la sua valutazione, si deve tener conto della possibile distanza di propagazione, dell'area di retrogressione e dell'eventuale espansione laterale del fenomeno franoso.

Le metodologie utili allo studio della propagazione delle frane sono molteplici e differenti in relazione alla tipologia del fenomeno in esame.

L'evoluzione spaziale del fenomeno è legata alla natura fisico-meccanica dello stesso ed è pertanto regolata da leggi complesse che devono tenere in considerazione i parametri fisici (massa, densità, ecc.), meccanici (coesione, resistenza al taglio, ecc.) e geometrici (forma dei blocchi, forma dei ciottoli) dei materiali. Inoltre, diversi fattori esterni, quali la topografia, la rugosità della superficie, la vegetazione, la presenza di strutture antropiche, ecc., influiscono sulla propagazione del fenomeno,

In letteratura vengono presentati modelli fisici per calcolare le distanze di propagazione di diversi tipi di frana (Miao et al., 2001); altri approcci sono di tipo empirico, correlando, ad esempio, le dimensioni della frana alle condizioni topografiche (Corominas, 1996; Rickenmann, 1999; McClung, 2001).

Per quanto riguarda la previsione dei limiti di retrogressione, essa si effettua essenzialmente durante il rilievo sul terreno. E' importante descrivere il tipo di frana e lo stile di attività, riportando in carta la presenza di segnali precursori, come fessure e scarpate nella zona di coronamento. In alcuni casi, il limite massimo di retrogressione può essere posto lungo la linea dello spartiacque, anche se spesso risulta troppo cautelativo. Una volta individuato il tipo di movimenti franoso e la possibile zona di propagazione della frana si procede alla valutazione dell'intensità che, come visto in precedenza, viene suddivisa in tre classi (Fig. 41 - 42).

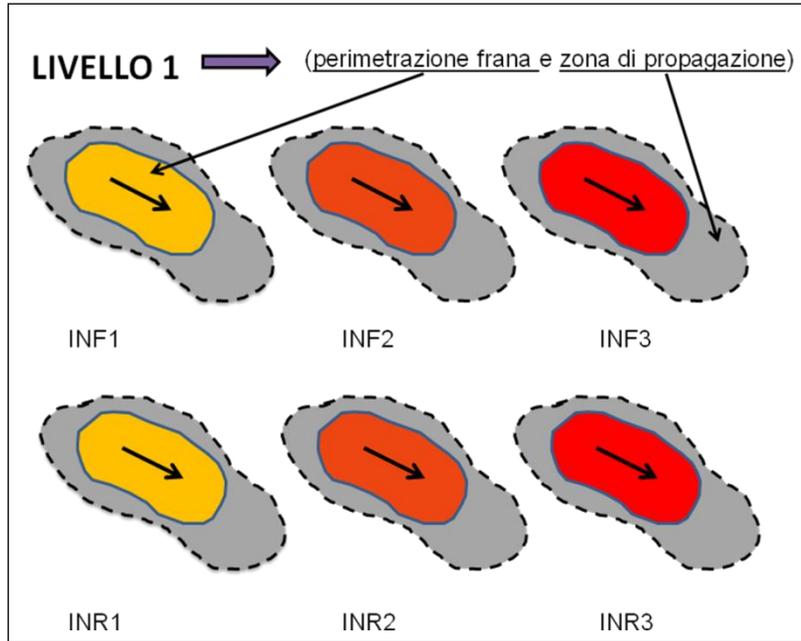


Figura 41 - Perimetrazione della frana e della zona di propagazione e attribuzione della classe di intensità.

LIVELLO 1				
Contorno frana	Intensità della frana			Zona di propagazione
Spessore linea	Colore			Colore
1,5	INF1/INR1	INF2/INR2	INF3/INR3	Le linee orizzontali assumono il colore dell'intensità della frana.
	Giallo R= 255 G= 255 B= 0	Arancione R= 255 G= 170 B= 0	Rosso R= 255 G= 0 B=0	

Figura 42 - Informazioni relative alle dimensioni delle linee e dei colori utilizzati nel "Livello 1".

Il livello 2 riguarda la realizzazione, sul tratto autostradale interessato dalla frana, di grafici i quali conterranno le informazioni relative all'indice di severità geometrica (ISG), velocità (VEL), intensità della frana (INF o INR), la probabilità

di accadimento (PRO) e il tipo di materiale coinvolto dalla frana (Fig. 43 - 44). I valori dei parametri riportati nei grafici dovranno essere normalizzati.

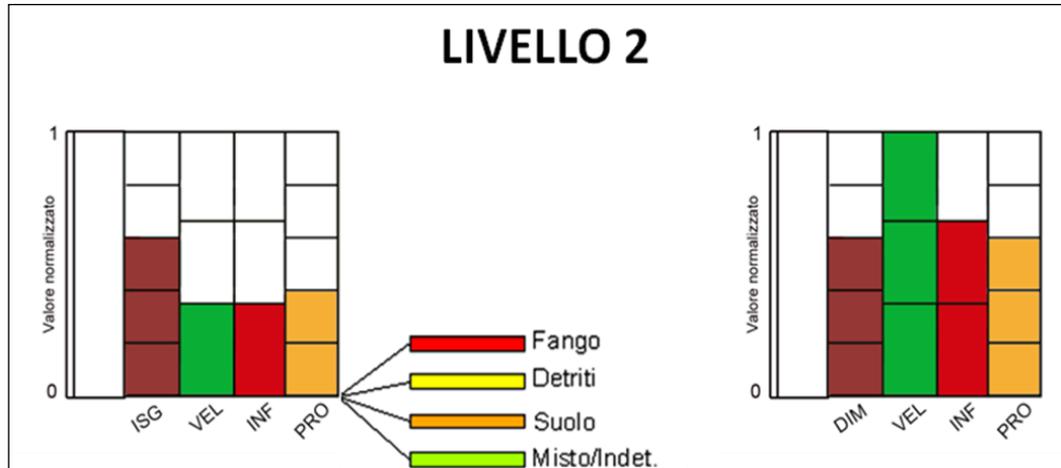


Figura 43 - Grafici che rappresentano il Livello 2 degli scenari di evento.

LIVELLO 2							
Indice di severità geometrica "ISG"	Velocità "VEL"	Intensità della frana "INF"	Probabilità di accadimento "PRO"	Tipo di materiale coinvolto			
Marrone R= 137 G= 90 B= 68	Verde R= 56 G= 168 B= 0	Rosso R= 230 G= 0 B= 0	Arancione R= 255 G= 170 B= 0	"Fango"	"Detriti"	"Suolo"	"Misto/Ind."
				Rosso R= 230 G= 0 B= 0	Giallo R= 255 G= 255 B= 0	Arancione R= 255 G= 170 B= 0	Verde R= 152 G= 230 B= 0

Figura 44 - Informazioni relative ai colori utilizzati nel "Livello 2".

Infine il Livello 3, che non è realizzabile per le frane da crollo, è un grafico che riporta, sul tratto autostradale interessato dalla frana, i dati relativi alla superficie della frana (SUP), corona della frana (COR), fronte della frana (FRO), spessore (SPE), volume (VOL), l'indice di severità geometrica (ISG), velocità (VEL), intensità della frana (INF), la probabilità di accadimento (PRO) e il tipo di

materiale coinvolto dalla frana (Fig.45-46). Anche in questo caso, i valori dei parametri riportati nei grafici dovranno essere normalizzati.

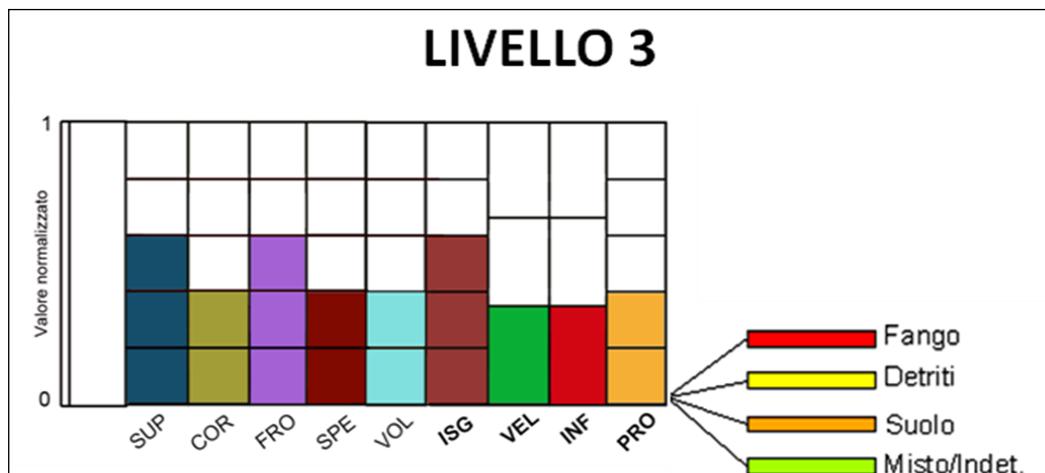


Figura 45 - Grafici che rappresentano il Livello 3 degli scenari di evento.

LIVELLO 3					
Superficie "SUP"	Corona "COR"	Fronte "FRO"	Spessore SPE"	Volume "VOL"	"ISG" - "VEL" - "INF" - "PRO" - Tipo di materiale coinvolto
Blu	Verde	Viola	Rosso	Azzurro	Considerare la legenda del Livello 2
R= 0 G= 132 B= 168	R= 115 G= 115 B= 0	R= 169 G= 0 B= 230	R= 168 G= 0 B= 0	R= 115 G= 223 B= 255	

Figura 46 - Informazioni relative ai colori utilizzati nel "Livello 2".

Riferimenti bibliografici

Agterberg F.P. & Cheng Q. (2002). *Conditional independence test for weights of evidence modelling*. Natural Resources Research, 11, 249-255.

Aleotti P. & Chowdhury R. (1999). *Landslide hazard assessment: Summary review and new perspective*. Bulletin of Engineering Geology of the Environment, 58: 21-44.

Aleotti P. & Polloni G., (2005) - *Valutazione e mitigazione del rischio frane*. Helelius Edizioni, Benevento, pp. 125.

Aleotti P., Balzelli P. & De Marchi D., (1996) – *Le reti neurali nella valutazione della suscettibilità da frana*. Geologia tecnica e ambientale, 4, 37-47.

Amadesi E. & Vianello G. (1978). *Nuova guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti*. Mem. Soc. Geol. It., 19, 53-60.

Amadesi E., Vianello G., Bonfatti G., Pignone R., Preti D. (1977). *Guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti*. Regione Emilia Romagna. MB T6. Ed. Pitagora, Bologna, 72 pp.

Amanti M., Carrara A., Castaldo G., Colosimo P., Gisotti G., Govi M., Marchionna G., Nardi R., Panizza M., Pecci M. & Vianello G. (1992). *Linee guida per la realizzazione di una cartografia Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000*. Versione Preliminare. Presidenza del Consiglio dei Ministri. Servizio Geologico. Progetto CARG 53pp.

Ambraseys N.N. (1988) - *Engineering Seismology*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 17, 1-105.

Ambraseys N.N., (1983) - *Evaluation of seismic risk*. In: Ritsema A.R. & Gurpinar A. (ed.), Seismicity and seismic risk in the offshore North Sea area. Reidel Pub. Co., Dordrecht, 317-345.

Anbalagan R. (1992). *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Eng. Geol., 32: 269-277.

Atkinson P.M., Massari R., 1998 - *Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Appennines, Italy*. Computers & Geosciences, 24 (4), 373-385.

Bartolomei A., Brugioni M., Canuti P, Casagli N., Catani F., Ermini L., Kukavacic M., Menduni G., Tosoni V. (2006). *Analisi della suscettibilità da frana a scala di bacino (Bacino del F. Arno, Toscana, Italia)*. Giornale di Geologia Applicata 3, 189-195.

Baum R.L., Godt J.W., Harp E.L., Mckenna J.P., McMullen S.R., (2005) - *Early warning of Landslides for rail traffic between Seattle and Everett, Washington, USA*, In: Hungr O., Fell R., Couture R. and Ebdhardt E. (Eds.), *Landslides Risk Management, The 2005 International Conference on Landslide Risk Management, New York*, 731-740.

Beven K.J. & M.J. Kirkby (1979). *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology*. Hydrol. Sci. Bull., 24, 43-69.

Bieniawski Z.T. (1974). *Geomechanics Classification of rock masses and its application in tunnelling*. Proc. 3rd Cong. ISRM, Denver , 2A, p.27.

Bonham-Carter G.F. (1996). *Geographic information systems for geoscientists, modelling with GIS*. Computer Methods in the Geosciences, 13, 398.

Bosi C. (1978). *Considerazioni e proposte metodologiche sulla elaborazione di carte della stabilità*. Geol. Appl. & Idrogeol., Bari, 13, 246-281.

Bosi C., Dramis F., Gentili B. (1985). *Carte geomorfologiche di dettaglio ad indirizzo applicativo e carte di stabilità*. Geol. Appl. & Idrogeol., Bari, 20 (2), 53-62.

Brabb E.E. (1984). *Innovative approaches to landslide hazard mapping*. Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto , 1, 307-324.

Brabb E.E., Pampeyan E.H., Bonilla M.G. (1972). *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. USGS Misc. Field Investigation Map, MF-360.

Bull., 17, 5-37.

Campbell R.H. (1973). *Isopleth map of landslide deposits, Point Dume quadrangle, Los Angeles County, California*. U.S. Geol. Surv. Misc. Map MF-535.

Caniani D., Pascale S., Sdao F., Sole A. (2008). *Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza*. *Natural Hazards*, 45, 55-72.

Cannon S.H. & Ellen S.D. (1988). *Rainfall that resulted in abundant debris flow activity during the storm*. In: "Landslides, floods and marine effects of the storm of Jan 3-5, 1982, in the S.Francisco Bay region, California". USGS Prof. Papers., 1434, 27-35.

Canuti P., Dramis F., Esu F., (1992). *Le condizioni di instabilità dei pendii nei centri abitati*. Principi e criteri generali ad uso degli Uffici Tecnici di Enti Pubblici. Pubbl. CNR-GNDCI n. 544.

Canuti P., Frascati F., Garzonio, C.A., Rodolfi G., (1979). *Dinamica Morfologica di un ambiente soggetto a fenomeni franosi e ad intensa attività agricola*. C.N.R., Pubbl. 142, 81-102.

Canuti P., Garzonio C.A., Rodolfi G., Vannocci P., (1985). *Stabilità dei versanti nell'area rappresentativa di Montespertoli (Firenze)*. *Carta di attività delle forme e di densità dei fenomeni franosi*. Tipografia S.EL.CA. Firenze.

Cardinali M., Reichenbach P., Guzzetti F., Antonini G., Cacciano M., Castellani M., Salvati P. (2002). *A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy*. *NHESS*, 2, 57-72.

Carrara A. & Merenda L. (1976). *Landslide inventory in Northern Calabria, Southern Italy*. *Geol. Soc. Of Am. Bull.*, 87, 1153-1162.

Carrara A. (1983). *A multivariate model for landslide hazard evaluation*. *Mathematical Geology*, 15, 403-426.

Carrara A., Bitelli G., Carlà R. (1997). *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*. *International Journal Geographical Information System*, 11.

Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. (1991). *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surface Processes and Landsform, 16, 427-445.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F. (1992). *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Journal, The Netherlands, 2, 172-183.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. (1995). *GIS technology in mapping landslide hazard*. In: Carrara A., Guzzetti F. (Eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.

Carson M.A. & Kirkby M.J. (1972). *Hillslope form and process*. Cambridge University Press, Cambridge, 475 pp.

Casagli N. & Rinaldi M. (1994). *Meccanismi di instabilità delle sponde nell'alveo del Fiume Sieve (Toscana)*. Atti del IV Convegno dei Giovani Ricercatori del Gruppo Nazionale Geologia Applicata. Riccione, 18-21 Ottobre, 1994. Tecnoprint, Bologna.

Cascini L. & Versace P. (1986). *Eventi pluviometrici e movimenti franosi*. Atti XVI Conv. Naz. di Geotecnica, Bologna, 3, 171-184.

Cascini L. & Versace P. (1988). *Relationship between rainfall and landslide in a gneissic cover*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne , 1, 565-570.

Catani F., Casagli N., Ermini L., Righini G., Menduni G. (2005). *Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin*. Landslides 2:329–342

Çevik E. & Topal T. (2003). *GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey)*. Environ Geol 44:949–962.

Chung C. F., Fabbri A. G., Van Westen C. J. (1995). *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. In: A. Carrara and F. Guzzetti (eds), Geographic Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer, Dordrecht, pp. 107–133.

Chung C.F. & Fabbri A.G. (2003). *Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping*. *Natural Hazards* 30: 451–472.

Clerici A., Cuccuru G., Trambaglio L., Lina F. (1993). *La realizzazione di una carta della stabilità dei versanti mediante l'uso di un sistema d'informazione geografica*. *Geol. Tecn. Amb.*, 4, 25-40.

Clerici A., Perego S., Tellini C., Vescovi P. (2002). *A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method*. *Geomorphology* 48:349–364.

Conforti M. (2009). *Studio geomorfopedologico dei processi erosivi nel bacino del T. Turbolo (Calabria settentrionale) con il contributo della spettrometria della riflettanza*. PhD Thesis, Università della Calabria, pp. 310.

Conforti M., Critelli S., Muto F., Carbone M. (2011). *Valutazione della suscettibilità da frana mediante un'analisi statistica in ambiente GIS: applicazione al bacino del T. Incinerato (Calabria Meridionale)*. *Engineering Hydro Environmental Geology*, Vol. 14, pp. 37-47.

Conforti M., Robustelli G., Muto F., Critelli S. (2012). *Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vitruvo river catchment (Calabria, south Italy)*. *Natural Hazards*, Vol. 61, pp. 127-141.

Conoscenti C., Di Maggio C., Rotigliano E. (2008). *GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy)*. *Geomorphology*, 94(3–4), 325–339.

Corominas J. (1996). *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 260-271.

Corominas J., Weiss E.E.J., Van Steijn H., Moya J. (1994). *The use of dating techniques to assess landslide frequency, exemplified by case studies from European countries*. In: Casale R., Fantechi R. & Flageollet J.C. (1994). *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*. Programme EPOCH. Final Report, 1, 71-94.

Cotecchia V. (1978). *Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements*. IAEG.

Cotecchia V., Lenti V., Salvemini A., Spilitoro G. (1986). *Reactivation of the large Buoninvente slide by the Irpinia earthquake of 23 Nov. 1980*. Proc. Int. Symp. on Engineering Geology Problems in Seismic Area, Bari, Geol. Appl. Idrogeol., 21 (4), 217-243.

Crescenti U. (1998). *Il rischio di frana: appunti per la valutazione*. Quaderni di Geologia Applicata, Vol. 5(2), pp. 87-100, Pitagora Ed., Bologna.

Crespellani T., Nardi R., Simoncini C. (1988). *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna, 185 pp.

Crosta G. & Locatelli C., (1999) – *Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo*. In “Studi in onore dei Saverio Belloni” (Orombelli ed.). Glauco Brigati, Genova. pp. 259 – 286.

Crosta, G.B., Dal Negro, P., Frattini, P., (2003) - *Soil slips and debris flows on terraced slopes*. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 31–42.

Crozier M. J. (1984). *Field assessment of slope instability*, in: Slope Instability, edited by: Brunsdon, D. and Prior, D. B., Chichester, Wiley, 103–142.

Crozier M.J. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. CDroom Helm Pub., London.

Cruden D. M. & Varnes D. J. (1994). *Landslides types and processes*. In: “Landslide: investigation and mitigation”. Transportation Research Board, National Academy of Science.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996). Landslides Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. NationalAcademy Press, WA, 36-75.

Cruden D.M. (1997). *Estimating the risk from landslide historical data*. In: Cruden D.M. & Fell R. (Eds.) *Landslide Risk Assessment*. Proc. Int. Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19-21 Feb. 1997, Balkema, Rotterdam, 177-184.

D'Elia B., Esu F., Pellegrino A., Pescatore T.S. (1985). *Some effects on natural slope stability induced by 1980 Italian earthquakes*. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, 4, 1943-1949.

Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y. (2002). *Landslide risk assessment and management: an overview*. Engineering Geology 64, 65-87.

Dai, F.C., Lee, C.F., Xu, Z.W., (2001) - *Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong*. Environmental Geology 40, 381–391.

DeGraff J.V. & Agard S.S. (1984). *Defining geologic hazards for natural resources management using tree-ring analysis*. Environmental Geology and Water Sciences, 6 (3), 147-155.

DeGraff J.V. & Canuti P. (1988). *Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices*. IAEG Bull., 38, 61-71.

Del Prete M., Giaccari E., Trisorio-Liuzzi G. (1992). *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata*. Pubbl. n 841-GNDICI, 84 pp.

Dietrich E.W., Reiss R., Hsu M.L., Montgomery D.R. (1995). *A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data*. Hydrological Processes, 9, 383-400.

Dietrich W. E. & Montgomery D.R. (1998). *SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, February 1998, 29 pp.

Dikau R., Brunsten D., Schrott L., Ibsen M.L. (1996). *Landslide recognition. Identification, movements and causes*. Wiley, Chichester, England, 251 pp.

Dramis F. & Gentili B. (1977). *Contributo allo studio delle acclività dei versanti nell'Appennino umbro-marchigiano*. Studi Geologici Camerti, 3, 153-164.

DRM-Délégation aux Risques Majeurs (1988). *Evaluation de la vulnérabilité. Plan d'Exposition aux risques*. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française. 112 pp.

DRM-Délégation aux Risques Majeurs (1990). *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs. Secrétariat d'Etat auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs*. La Documentation Française. 143 pp.

Einstein H.H. (1988). *Special lecture: landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1075-1090.

Einstein H.H. (1997). *Landslide risk: systematic approaches to assessment and management*. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Proc. Int. Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19-21 February 1997, Balkema, Rotterdam, 25-50.

Ercanoglu M. & Gokceoglu C., (2004) - *Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)*. *Engineering Geology*, 75, 229-250.

Ercanoglu M., (2005) – *Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 979–992.

Ermini L., Catani F., & Casagli N., (2005) – *Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment*. *Geomorphology*, 66, 327–343.

Esu F., (1984) - *Fattori che governano il comportamento dei pendii ed il verificarsi delle frane e loro evoluzione in termini geotecnici*. In: Pescatore T. (ed.) "Lineamenti di geologia regionale e tecnica: le aree colpite dal terremoto del 23/11/1980". Guida ai criteri di lavoro. Formez, Napoli, 119-140.

Evans S.G., (1997) - *Fatal landslides and landslide risk in Canada*. In: Cruden D.M. & Fell R. (Eds.) *Landslide Risk Assessment*. Proc. Int. Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19-21 Feb. 1997, Balkema, Rotterdam, 185-196.

Falasci F., Federici P.R., Puccinelli A., Bottai M., Casarosa N., D'Amato Avanzi G., Giacomelli F., Giannecchini R., Pochini A., Ribolini A., Salvati N., Stano S., Testi C.,

(2007) - *Metodologie di valutazione della suscettibilità di frana in alcune aree campione della Toscana settentrionale*. Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A, 112, 21-39.

Fell R., and Hartford D., (1997) - *Landslide Risk Management*. In: Cruden D.M., Fell R., eds. *Landslide risk assessment*. Proc. Int. Workshop on landslide risk assessment, Honolulu, Balkema, Rotterdam, 51-110.

Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z., (2008) - *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, v. 102, p. 85-98.

Fell R., (1994) - *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Can. Geotechn. J., 31 (2), 261-272.

Fernández T., Irigaray C., El Hamdouni R., Chacón J. (2003) - *Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area (Granada, Spain)*. Natural Hazards (Special Issue on Landslides & GIS, J.Chacón & J.Corominas, ed.), 30: 297-308.

Flageolet J.-C., 1999. *Landslide hazard - a conceptual approach in risk viewpoint*. In: Casale R., Margottini C. eds., *Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment*. Springer-Verlag, Berlin, 3-18.

Foster G.R. & Wischmeier W.H., (1974) - *Evaluating irregular slopes for soil loss prediction*. Transactions of ASAE 17(1):305-309.

Garbrecht J. & Martz W., (1997) - *The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models*. Journal of Hydrology, vol. 193 pp. 204-213.

Giacomelli P., Sterlacchini S., De Amicis M., (2003) - *La valutazione del rischio di frana*. Firenze University Press, Aestimum, 42, 31-52.

Glade T., (1998) - *Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand*. Environmental Geology, 35, 2-3.

Glade T., Anderson M., Crozier M.J. eds., 2005 - *Landslide hazard and risk*. John Wiley & Sons, New York, 803.

GNGFG, (1987) - *Cartografia della pericolosità connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti*. A cura di Carrara A., Carton A., Dramis F., Panizza M. & Prestininzi A. Boll. Soc. Geol. It., 106, 199-221.

Govi M. & Sorzana P.F., (1980) - *Landslide susceptibility as a function of critical rainfall amount in Piedmont Basin (North-Western Italy)*. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 14, 43-61.

Govi M., (1977) - *Photo interpretation and mapping of the landslides triggered by the Friuli earthquake (1976)*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Paris, No 15.

Greco R., Sorriso-Valvo M., Catalano E., (2007) - *Logistic Regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy*. Engineering Geology 89, 47-66.

Guida D., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Metcalf G., Salzano G., Vallario A., Vecchio V., Zicari G. (1979) - *Proposta per l'elaborazione di cartografia tematica inerente alla dinamica dei versanti*. Mem. Soc. Geol. It., 19, 170-198.

Guida D., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Metcalf G., Salzano G., Vallario A., Vecchio V., (1978) - *Una proposta per l'elaborazione di carte della franosità*. Boll. Soc. Natur. in Napoli, 87: 337-361.

Gupta V., (2005) - *The relationship between tectonic stresses, joint patterns and landslides in the higher Indian Himalaya*. Journal of Nepal Geological Society 31, 51-58.

Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., (1994) - *The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy*. Environmental Management, 18 (4), 623-633.

Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., Carrara A., (2000) - *Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy*. Environmental Management 25 (3), 247-363.

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., (1999) - *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology*, 31, 181-216.

Habib P., (1977) - *Note sur le rebondissement des blocs rocheux*. In *Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, ISMES boll. 90, pp. 123 – 125.

Hammond, C., D. Hall, S. Miller, P. Swetik, (1992) - *Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0*. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station.

Haneberg W.C., (2004) - *A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment*. *Environmental & Engineering Geosciences*, 10 (1): 23-47.

Hansen A. (1984) - *Landslide hazard analysis*. In: Brunsden D., Prior D.B. (Eds.), *Slope Instability*. Wiley, New York. 523-602.

Hartlén J. & Viberg L., (1988) - *General Report: Evaluation of landslide hazard*. Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1037-1058.

Heim A., (1932) - *Bergstruz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zurich, 218 pp.

Hollingsworth R. & Kovacs G.S., (1981) - *Soil slumps and debris flows: prediction and protection*. *Bull. Am. Ass. of Eng. Geologists*, 18 (1), 17-28.

Horlick-Jones T., Amendola A., Casale R. (Eds.) (1995) - *Natural risk and civil protection*. Commission of the European Communities, E&FN Spon, London, 554 pp.

Hsü K., (1975) - *Catastrophic debris stream (sturzstorm) generated by rockfalls*. *Bull. Geol. Soc. of America*, 86, 129-140.

Humbert M., (1976) - *Le cartographie en France des Zones Exposées à des Risques liés aux Mouvements du Sol - Cartes ZERMOS*. *IAEG Bull.*, 16, 80-82.

Humbert M., (1977) - *La Cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des carte des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol*. *BRGM Bull.*, Série II, Sect. III, n1/2, 5-8.

Hungro O., (1981) - *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. PhD Thesis. University of Alberta.

Hungr O., (1995) - *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches*. Canadian Geotechnical Journal: v. 32, p. 610-623.

Hutchinson J.N. & Bhandari R.K., (1971) - *Undrained loading, a fundamental mechanism of mudflows and other mass movements*. Géotechnique, 21, 353-358.

Hutchinson J.N. & Chandler M.P., (1991) - *A preliminary hazard zonation of the Undercliff of the Isle of Wight*. In: Chandler R.J. (ed.): "Slope Stability Engineering", Thomas Telford, London, 197-205.

Hutchinson J.N. & Gostelow T.P., (1976) - *The development of an abandoned cliff in London clay at Hadleigh, Essex*. Phil. Trans. Roy. Soc. London A283, 557-604.

Hutchinson J.N., (1969) - *A reconsideration of the costal landslide at Folkestone Warren, Kent*. Géotechnique, 19(1), 6-38.

Hutchinson J.N., (1970) - *A coastal mudflow on the London Clay cliffs at Beltinge, North Kent*. Géotechnique, 20, 412-438.

Hutchinson J.N., (1973) - *The response of London clay cliffs to differing rates of toe erosion*. Geol. Appl. & Idrogeol., 8, 221-239.

Hutchinson J.N., (1987) - *Mechanisms producing large displacements in landslides on pre-existing shears*. 1st Sino-British Geol. Conf., Taipei, Memoir of the Geological Survey of China, 9, 175-200.

Hutchinson J.N., (1988) - *General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology*. Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 1, 3-35.

Hutchinson J.N., (1993) - *Some aspects of the morphological and geotechnical parameters of landslides, with examples drawn from Italy and elsewhere*. Atti 2° Conv. Naz. Giovani Ricercatori Geologia Applicata, Viterbo, Geologica Romana.

Hutchinson J.N., (1995) - *Keynote paper: landslide hazard assessment*. In Bell (Ed.), Landslides. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.

Ibsen M.L. & Brunsten D., (1996) - *The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight*. *Geomorphology*, 15, 241-258.

IDNHR, Advisory Committee (1987) - *Confronting Natural Disasters. An International Decade for Natural Hazard reduction*. National Academy Press. WA, 60 pp.

Imaizumi, F., Sidle, R.C., Kamei, R., (2007) - *Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan*. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 827–840.

Iverson R. M., (2000) - *Landslide by rain infiltration*, *Resources Research*, 36: 1897-1910.

Keefer D.K., (1984) - *Landslides caused by earthquakes*. *Bull. Soc. Geol. Am.*, 95, 406-421.

Kienholz H., (1978) - *Maps of Geomorphology and Natural Hazard of Griendelwald, Switzerland, scale 1:10.000*. *Artic and Alpine research*, 10, 169-184.

Kienholz H., Bichsel M., Grunder M., Mool P., (1983) - *Kathmandu Kakani area, Nepal: Mountain hazards and slope stability map*. United Nations University, Mountain Hazards mapping Project. Map No 4, Scale 1:10.000.

Kienholz H., Mani P., Klay M., (1988) - *Rigi Nordlene, Beurteilung der naturgefahren und waldbauliche prioritatfestlegung*. *Proc. Interpraevent 1988, Graz*, 1, 161-174.

Kleinbaum, D.G., (1991) - *Logistic Regression: A Self-learning Text*. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Kobashi S. & Suzuki (1988) - *Hazard index for the judgement of slope stability in the Rokko Mountain region*. *Proc. Interpraevent 1988, Graz*, 1, 223-233.

Lee S. & Min K., (2001) - *Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea*. *Environ. Geol.*, 40: 1095-1113.

Lee S. & Pradhan B., (2007) - *Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*. *Landslides*, 4(1): 33–41.

Lee S., (2005) - *Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data*. *Int. J. Remote Sens.*, 26: 1477-1491.

Lee S., Choi J., Min K., (2002) - *Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model*. *Environmental Geology* 43, 120–131.

Lee S., Choi J., Min K., (2004) - *Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea*. *Int. J. Remote Sensing*, 25(11): 2037-2052.

Lee S., Ryu J., Min K., Won J., (2001) - *Development of two artificial neural network methods for landslide susceptibility analysis*. *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 5: 2364-2366.

Lemos L., Skempton A.W., Vaughan P.R., (1985) - *Earthquake loading of shear surface in slopes*. *Proc. 11th ICSMFE, San Francisco*, 4, 1955-1958.

Leone F., Astè J.P., Leroi, E., (1996) - *Vulnerability assessment of elements exposed to mass movements: working toward a better risk perception*. In: Senneset K., ed., *Landslides, Glissements de terrain*, *Proc. 7th Int. Symp. Landslides, Trondheim, Balkema, Rotterdam*, 263–270.

LPC - Laboratoire des Ponts et Chaussées, (1978) - *Eboulements et chutes de pierres sur les routes. Méthode de Cartographie*. Group d'Etudes des Falaises (GEF). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport de Recherche No.80, 63pp.

Lucini P., (1969) - *Un metodo grafico per la valutazione della franosità*. *Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata di Napoli*, 2.

Magliulo P., Di Lisio A., Russo F., Zelano A., (2008) - *Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy*. *Springer Science. Natural Hazards. (Natural Hazards)* 47, 411-435.

Mahr T. & Malgot (1978) - *Zoning Maps for regional and urban development based on slope stability*. Proc. 3rd Int. Congr. IAEG, Sec.I, 1, 124-137.

Maione U. & Moisello U., (1981) - *Appunti di idrologia*. La Goliardica Pavese, 2° Edizione, 251 pp.

Malgot J., Baliak F., Cabalova D., Mahr T., Nemcock A., (1973) - *Mapa svahovych deformacii Handlovskej kotliny*. A. Záklandá mapa; B.Mapa inženýrsko-geologickeho rajonovania.

Margottini C. & Fantucci R., (1993) - *Dendrogeomorphology in landslide analysis: state of art*. RT/AMB/93/20, ENEA, Roma, 22 pp.

May, C.L., 2002 - *Debris flows through different forest age classes in the central Oregon Coast Range*. Journal of the American Water Resources Association 38, 1097–1113.

McClung D.M., (2001) - *Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models*. Canadian Geotechnical Journal, 38, 1254-1265.

Mejía-Navarro M., Wohl E.E., Oaks S.D., (1994) - *Geological hazards, vulnerability and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado*. Geomorphology, 10, 331-354.

Menard S.W., (1995) - *Applied logistic regression analysis*. SAGE, Thousand Oaks

Meneroud J.P., (1978) - *Cartographie des risques dans les Alpes-Maritimes (France)*. Proc. 3rd Cong. IAEG, Sec.I, 2, 98-107.

Miao T.D., Liu Z.Y., Niu Y.H., Ma C.W., (2001) - *A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides*. Canadian Geotechnical Journal 38,217-226.

Montgomery D.R. & Dietrich W.E., (1994) - *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding*. Water Resource Research, 30 (4), 1153-1171.

Montgomery D.R., Wright R.H., Booth T., (1991) - *Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales*. Bull. Am. Ass. of Eng. Geologists, 28 (3), 303-323.

Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R., (1991) - *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. Hydrological Processes 5, 3–30.

Moore I.D. & Wilson J.P., (1992) - *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation*. Journal of Soil and Water Conservation 47(5):423-428.

Morgan B.W., 1968 - *An introduction to Bayesian statistical decision process*. Prentice Hall New York.

Morgenstern N.R., (1985) - *Geotechnical aspects of environmental control*. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, 1, 155-186.

Murk B.W., Skinner B.J., Porter S.C., (1997) - *Dangerous Earth. An Introduction to Geological Hazards*. Wiley, New York, 300 pp.

Nagarajan R., Roy A., Vinod Kumar R., Mukherjee A., Khire M.V., (2000) - *Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions*. Bull. Eng. Geol. Env. 58, 275–287.

Nardi I., (1996) - *Stratificazione e morfologia dei versanti: delimitazione automatica delle aree omogenee in un sistema informativo territoriale*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 19, 71-77.

Nardi R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Trivellini M., (1987) - *Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca). 2): Carta geologica e carta della franosità degli elementi "Sillico", "Castelnuovo Garfagnana", "Cascio", "Castelvecchio Pascoli", "Gallicano", "Barga", "Fornaci di Barga" e "Ghivizzano" (scala 1:10.000)*. Boll. Soc. Geol. It., 106, 819-832.

Neeley M.K. & Rice R.M., (1990) - *Estimating risk of debris slides after timber harvest in northwestern California*. Bull. Am. Ass. of Eng. Geologists, 27 (3), 281-289.

NERC-National Environment Research Council (1975). *Flood studies report*, Vol 1.

Newmark N.W. (1965). *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Géotechnique, 25, 4.

Nilsen T.H. & Brabb E.E. (1977). *Slope stability studies in the San Francisco bay region, California*. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 3, 235-243.

Nilsen T.H., Wright R.H., Vlastic C., Spangle W.E., (1979) - *Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California*. US Geological Survey Professional Paper 944, 104 pp.

O'Callaghan J. F. & Mark D.M., (1984) - *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28.323-344.

O'Loughlin E.M., (1986) - *Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis*. Water Resources Research, 22 (5), 794-804.

Pachauri A.K., Gupta P.V., Chander R., (1998) - *Landslide zoning in a part of the garhwal Himalayas*. Envir. Geol., 36: 325-334.

Pachauri, A.K., and Pant M., (1992) - *Landslide hazard mapping based on geological attributes*. Engineering Geology, 32:81-100.

Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N., (1998) - *The SINMAP approach to terrain stability mapping*. In: MOORE D.P. & HUNGR O. (eds) Proceedings international congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment 8, 2, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands: 1157-1165.

Panizza M., (2001) - *Geomorphosites: concepts, methods and example of geomorphological survey*. Chinese Science Bulletin, 46, Suppl. Bd, 4-6.

Papani G. & Tellini C., (1973) - *Metodo elementare per elaborare uniformemente carte della stabilitā potenziale dei terreni. Studio della parte media della Valle Tresinaro*. Ateneo Parmense. Acta Naturalia, 9 (2).

Parise M., Sorriso-Valvo M. & Tansi C., (1997) - *Mass movements and tectonics in the Aspromonte massif (Southern Italy)*. Engineering Geology, 47, 89-106.

Petley D.N. & Murphy W., (2000) - *The Development of a Landslide Hazard Assessment Scheme for a Mountainous Area in E. Taiwan*. In: Bromhead A.E., Dixon N. and Ibsen M.L. eds.: *Landslides in research, theory and practice*. Thomas Telford, London, 1203-1208.

Pfeiffer T. & Bowen T. (1989). *Colorado Rockfall Simulation Programm*. Colorado School of Mines- US Department of Transportation Federal Highway Administration, Final Report.

Pierson, L.A., Davis, S.A., Van Vickle, R., (1990) - *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*. Report FHWA-OR-EG-90-01, Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation, Washington, DC.

Plattner T., 2005. *Modelling public risk evaluation of natural hazards: a conceptual approach*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 357-366.

Polemio M. & Petrucci O., (2000) - *Rainfall as a landslide triggering factor: an overview of recent international research*. In: Bromhead E., Dixon N. & Ibsen M.L. (Eds.) *Landslides in research, theory and practice*. Proc. 8th Int. Symp. on Landslides, Cardiff, Thomas Telford, London, 2000, 1219-1226.

Radbruch-Hall D.H. & Crowther K.C., (1973) - *Map showing areas of estimated relative amounts of landslides in California*. U.S. Geol. Survey Misc. Inv. Map, MF-771.

Radbruch-Hall D.H., Colton R.B., Davies W.E., Skipp B.A., Lucchitta I., Varnes D.J., (1976) - *Preliminary landslide overview map of the Conterminous United States*. U.S. Geol. Survey Misc. Field Studies Map, MF-771.

Rago V., (2012) - *Carta inventario e caratterizzazione dei movimenti franosi dell'Alto Jonio cosentino*. Tesi di laurea, Università della Calabria, pp. 149.

Rautela P. & Lakhera R.C., (2000) - *Landslide risk analysis between Giri and Ton Rivers in Himalaya (India)*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2, 153– 160.

Renard K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder, (1997) – *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agr. Handb. No 703.

Rib H.T. & Liang T., (1978) - *Recognition and identification*. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), *Landslides analysis and control*. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA, 34-80.

Rickenmann D., (1999) - *Empirical relationships for debris flows*. *Natural Hazards*, 19, 47-77.

Rodriguez Ortiz J.M. et al., (1978) - *Regional Studies on Mass Movements in Spain*. In: Congress, IAEG Madrid, Spain, 1978. In *Landslide Risk Assessment* D. Cruden and R. Fell (editors). Balkema, Rotterdam.

Romana M., (1985) - *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. *Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics*. Zacatecas. 49-53.

Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., (1986) – *Learning internal representations by error propagation*, in: *Parallel Dist. Proc.*, edited by: Rumelhart, D. E., and McClelland, J. L., Cambridge, 318–362.

Rupke J., Cammeraat E., Seijmonsbergen A.C., Van Westen C.J., (1988) - *Engineering geomorphology of the Widentobel catchment, Apenzell and Sankt Gallen, Switzerland. A geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability*. *Engineering Geol.*, 26, 33-68.

Saha A.K., Gupta R.P., Arora M.K., (2002) - *GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas*. *Int J Remote Sensing* 23, 57–369.

Saha A.K., Gupta R.P., Sarkar I., Arora M.K., Csaplovics E., (2005) - *An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas*. *Landslides* 2:61–69.

Sangrey D.A., Harrop-Williams W., Klaiber J.A., (1984) - *Predicting groundwater response to precipitation*. *J. Geotech. Eng.ing, ASCE*, 110(7), 957-975.

Sarma S.K., (1979) - *Stability analysis of embankments and slopes*. Proc. ASCE, 105, GT5, 1511-1524.

Sassa K., (1988) - *Special lecture: Geotechnical model for the motion of landslides*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, 1, 37-55.

Sassa K., (1992) - *Access to the dynamic of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring apparatus*. Proc. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch (New Zealand), Balkema, 3, 1919-1937.

Scheidegger A.E., (1973) - *On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*. Rock Mechanics, 5, 231-236.

Scheidegger A.E., (1994) - *Hazards: singularities in geomorphic systems*. Geomorphology, 10, 19-25.

Schoeneich P., (1991) - *La datation des glissements de terrain*. Proc. VI Int. Symp. On Landslides, Christchurch (New Zealand), 1992, Balkema, 1, 205-212.

Schuster R.L. & Krizek R.J., (1978) - *Landslides Analysis and Control*. Washington Transportation Research Board, Special report 176. National Academy of Sciences, WA, 234 pp.

Seed H.B. & Idriss I.M., (1967) - *Liquefaction of saturated sands during cyclic loading*. Proc. ASCE, 92, SM6, 69-84.

Seed H.B., (1968) - *Landslides during earthquake due to soil liquefaction*. Terzaghi lecture, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 94, SM5.

Seed H.B., (1975) - *Earthquake effects on soil foundation systems*. In: Fang H.Y. Foundation engineering Handbook, 2nd ed., 1991. Van Nostrand Reinhold, New York.

Skempton, A.W., DeLory, F.A., (1957) - *Stability of natural slopes in London clay*. Proceedings 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, pp. 378– 381.

Smith K., (2004) - *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster*. Routledge, London, 306.

Soeters R. & Van Westen C.J., (1996) - *Slope stability: recognition, analysis and zonation*. In: Turner AK, Shuster RL (eds) "Landslides: investigation and mitigation". Transportation Research Board – National Research Council, Special Report 247: 129-177.

Sorriso Valvo M. & Tansi C., (1996) - *Grandi frane e deformazioni gravitative profonde di versante della Calabria. Note illustrative della carta al 250.000*. Geografia fisica e dinamica quaternaria, 19, 395-408.

Spiegelhalter D.J., (1986) - *Uncertainty in expert systems*. In: Gale W.A., ed., Artificial intelligence and statistics. Addison Wesley, Reading, 17-55.

Starkel L., (1966) - *The palaeogeography of Mid and Eastern Europe during the last cold stage and Western European comparisons*. Phil. Trans. Royal Society, London, B280, 351-372.

Starosolzky O. & Melder O.M., (1989) - *Hydrology of disasters. World Meteorological Organisation Technical Conference, Genova, November 1988*. James and James, London, 319 pp.

Stevenson P.C., (1997) - *An empirical method for the evaluation of the relative landslide risk*. Int. Ass Eng. Geol. Bull., 16, 69-72.

Stout M.L., (1977) - *Radiocarbon dating of landslides in Southern California*. California Geology, 99-105.

Süzen M.L. & Doyuran V., (2004) - *Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey*. Eng Geol 71:303–321.

Tarboton D. G., (1997) - *A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research, 33(2): 309-319.

Terzaghi K., (1950) - *Mechanism of landslides, in Application of Geology to Engineering Practice*. Berkey Vol., Geological Society of America, p.83-123.

Thorne C.R., (1982) - *Processes and mechanisms of river bank erosion*. In: R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne (ed.) *Gravel-bed Rivers*, Wiley, Chichester, 227-271.

Trustrum N.A. & De Rose R.C., (1988) - *Soil depth-age relationship of landslides on deforested hillslopes, Taranaki, New Zealand*. *Geomorphology*, 1, 143-160.

Turner A.K. & Schuster R.L., (Eds.) (1995) - *Landslides, investigation and mitigation*. *Transportation Research Board Special Report 247*. National Academy Press, WA, 673 pp.

Valera J.E. & Donovan W.C., (1977) - *Soil Liquefaction Procedures. A Review*. J. Geol. Eng. Div. ASCE, 103.

Van Den Eeckhaut M., Moeyersons J., Nyssen J., Abraha A., Poesen J., Haile, Mitiku, Deckers J., (2009) - *Spatial patterns of old, deep-seated landslides: a case-study in the northern Ethiopian highlands*. *Geomorphology* 105, 239–252.

Van Westen C.J., (1993) - *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. ITC publication no 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 pp.

Van Westen C.J., (1997) - *Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for windows application guide*. Enschede, The Netherlands, ITC Publication N. 15: 73-84.

Van Westen C.J., Rengers N., Terlien M.T.J., Soeters R., (1997) - *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation*. *Geologische Rundschau* 86:404–414.

VanDine, D.F., Bovis, M.J., (2002) - *History and goals of Canadian debris flow research, a review*. *Natural Hazards* 26, 69–82.

Varnes D.J. & IAEG, (1984) - *Landslides Hazard Zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris, vol.3, 63 pp.

Varnes D.J., (1978) - *Slope movements, type and processes*. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), *Landslides analysis and control*. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA , 11-33.

Vecchia O., (1978) - *A simple terrain index for the stability of hillsides or scarps*. In: J.D. Geddes (ed.) "Large Ground Movements and Structure. J.Wiley & Sons , New York, 446-461.

Vertessy R., O'loughlin E., Beverly E., Butt T., (1994) - *Australian experiences with the CSIRO Topog model in land and water resources management*. UNESCO International Symposium on Water Resources Planning in a Changing World, Karlsruhe, Germany, III: 135-144.

White I.D., Mottershead D.N., Harrison S.J., (1992) - *Environmental systems, an introductory text*. Chapman & Hall, London, 616.

Wilson J. P. & Gallant J.C., (2000) - *Secondary Topographic Attributes*. In: Wilson J. P. and Gallant J. C., eds., *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 87-132.

Wischmeier W.H. & Smith D.D., (1978) - *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. USDA Agricultural Handbook 537. Washington, DC:USDA.

Wong H.N., Ho K.K.S., Chan Y.C., 1997. *Assessment of the consequences of landslides*. In: Cruden D.M., Fell R., eds., *Landslide risk assesment*, Proc. Int. Workshop on landslide risk assessment, Honolulu. Balkema, Rotterdam, 111 - 149.

WP/WLI-International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1993) - *A suggested method for describing the activity of a landslide*. IAEG Bull., 47, 53-57.

Wright R.H., Campbell R.H., Nilsen T.H., (1974) - *Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits*. Geological Society of America. *Geology*, 2, 483-485.

Wu S.S., (1984) - *Rockfall evaluation by computer simulation*. Transportation Research Board, n. 1031.

Yalçın A., (2007) - *The Use of Analytical Hierarchy Process and GIS in Production of Landslide Susceptibility Maps*. J. Faculty Eng. Archit. Selcuk Univ., 22(3): 1-14

Yalcin A., (2008) - *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparison of results and confirmations*. Catena 72:1–12.

Yin K.L. & Yan T.Z., (1988) - *Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne , 2, 1269-1272.

Zézere J. L., (2002) - *Landslide susceptibility assessment considering landslide typology, A case study in the area north of Lisbon (Portugal)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, European Geophysical Society, 2, 73-82.

