



LINEE GUIDA PER LA PIANIFICAZIONE E LA PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA

WP4 - ACTION 4.1b: HYDROGEOLOGICAL RISK MITIGATION

UNITÀ OPERATIVA (UNISA01)

Autori:

Prof. Settimio Ferlisi e Dr. Ing. Gianfranco Nicodemo

(Dipartimento di Ingegneria Civile - DICIV, Università degli Studi di Salerno)



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Sommario

1. INTRODUZIONE	3
2. ANALISI QUALITATIVA E QUANTITATIVA DEL RISCHIO DA FRANA	5
3. NORMATIVE DI SETTORE VIGENTI IN ITALIA	9
4. CATEGORIE DI INTERVENTI	13
4.1. Interventi di prevenzione	17
4.2. Interventi di protezione	22
4.3. Interventi non strutturali basati sul monitoraggio strumentale	25
4.3.1. Sistemi di monitoraggio e modelli a supporto dei dati sperimentali	26
4.3.2. Il Presidio Territoriale	28
5. PIANIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI	31
6. APPROCCI ALLA PROGETTAZIONE DEL SINGOLO INTERVENTO STRUTTURALE	38
7. VERIFICA DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI E ANALISI COSTI-BENEFICI	41
8. RICADUTE SULL'IMPIEGO DI RaStEM	46
9. CONCLUSIONI	55
Bibliografia	57

1. INTRODUZIONE

Sono ancora impressi nella memoria di tutti gli accadimenti che hanno tragicamente interessato l'Emilia-Romagna nel maggio del 2023, incluso il pianto delle persone colpite per la perdita, parziale o totale, delle proprie cose. Un pianto che fa sorgere delle domande: è davvero inevitabile giungere a questo? siamo certi del fatto che non si può far nulla per garantire, oltre alla salvaguardia della vita umana, anche la salvaguardia delle cose?

Per tentare di rispondere a queste domande, appare necessario partire da una prima evidenza che scaturisce dagli esiti di un'indagine storica che ha riguardato la Regione Campania in un arco temporale di 366 anni che si estende dal 1640 al 2006 (Cascini et al., 2008). Da tale indagine è emerso l'accadimento di 293 eventi che hanno causato almeno una vittima, per un totale di 2360 vittime stimate. Di queste, circa un terzo si sono registrate in quattro eventi occorsi nello scorso secolo (ottobre 1910, marzo 1924, ottobre 1954, maggio 1998). Questo a riprova del fatto che gli eventi tragici si ripetono sistematicamente, sebbene con diverse cause d'innescio e diversi meccanismi. D'altra parte, sono innegabili le responsabilità dell'uomo sull'entità delle conseguenze occorse, per come evidenziato da Annan (2004): “[...] *Le comunità dovranno sempre affrontare i pericoli naturali, ma i disastri odierni sono spesso generati, o almeno esacerbati, dalle attività umane. [...] La scarsa pianificazione territoriale, la cattiva gestione dell'ambiente e la mancanza di principi regolatori aumentano il rischio e aggravano gli effetti dei disastri*”. Prova ne sia che, in Italia, nel secolo scorso un ruolo crescente è stato giocato dalla intensa e poco controllata urbanizzazione del territorio, soprattutto a partire dalla fine della Seconda guerra mondiale quando l'esigenza primaria era rappresentata dal *costruire* e non dal *dove costruire* (Cascini, 2014). Sulla base di queste evidenze, cosa si è fatto? Indubbiamente molto, a partire da quanto prodotto dalla Commissione presieduta dal prof. De Marchi, istituita dopo l'alluvione di Firenze del 1966, e che ha condotto alla promulgazione della Legge 183/89 la quale individua nel bacino idrografico l'unità fisiografica di riferimento per tutte le azioni di difesa, tutela e pianificazione delle risorse suolo e acque. A valle dei citati eventi occorsi in Campania nel maggio del 1998 si è assistito a una ulteriore accelerazione dell'iter legislativo che ha condotto alla promulgazione del D.L. 180/98 (noto come “decreto Sarno”) e del suo decreto attuativo (il D.P.C.M. del 29 settembre 1998); a questi, dopo gli eventi di Soverato del settembre 2000, ha fatto seguito la Legge 365/2000 grazie alla quale oggi l'Italia può dotarsi di una zonazione del rischio da frana e da alluvione su tutto il suo territorio, assurgendo – di fatto – a nazione guida in Europa in termini di previsione del rischio idrogeologico. Peraltro, tale zonazione assume

un significato rilevante ai fini della pianificazione territoriale e della mitigazione del rischio per la vita umana con interventi non strutturali. Viceversa, non può essere utilizzata per la progettazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio, che mirano anche alla salvaguardia delle cose (in particolare, le case e le infrastrutture) sia per la scala dello studio e sia per la mancanza di strumenti con i quali definire le priorità tra tutte le aree classificate a rischio elevato (R3) e molto elevato (R4). A tal riguardo, le presenti Linee Guida intendono offrire degli spunti che sono allo stesso tempo operativi e di riflessione. In particolare, dando per scontate le classificazioni dei fenomeni franosi usualmente adottate nella pratica corrente (Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2014), i diversi Capitoli che le compongono entrano nel merito delle differenze fra analisi qualitative (quali quelle adottate ai fini della richiamata zonazione ufficiale) e analisi quantitative del rischio da frana. Quindi, dopo un richiamo alle normative di settore vigenti in Italia, si entra nel merito delle diverse categorie di interventi di mitigazione del rischio da frana, distinguendo fra misure non strutturali e strutturali. Con riferimento a queste ultime, si propongono innanzitutto delle procedure che, secondo una logica multiscalare di tipo top-down (Cascini, 2015), abilitano alla prioritizzazione dei Comuni all'interno di una Regione e delle aree all'interno di un Comune che richiedono la mitigazione del rischio rispetto ad assegnate tipologie di frana. Di seguito, si entra nel merito degli approcci alla progettazione dei singoli interventi strutturali (distinguendo fra quelli basati sul concetto di fattore di sicurezza, quelli che ricorrono al cosiddetto evento di progetto e quelli centrati su analisi quantitative del rischio) e di come, in relazione a ciascuno di essi, vadano differenziate le modalità di valutazione dell'efficacia dell'intervento progettato, esaltando il concetto di rischio residuo. Infine, si illustrano le ricadute che i concetti illustrati possono avere sull'impiego dell'applicativo web-GIS denominato "RaStEM – Rappresentazione Standardizzata degli Effetti di Mitigazione", sviluppato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) in accordo con quanto stabilito dal D.P.C.M. del 27.09.2021, che si propone nel ruolo di piattaforma centralizzata su cui poter condividere, in formato sintetico e standardizzato, le caratteristiche significative di tutti gli interventi per la difesa del suolo per i quali si intende avanzare la presentazione delle istanze di finanziamento sul ReNDiS (ISPRA, 2023).

2. ANALISI QUALITATIVA E QUANTITATIVA DEL RISCHIO DA FRANA

L'analisi del rischio è la prima componente del più ampio processo di gestione del rischio da frana (Fell et al., 2005) che prevede, nell'ordine, l'analisi, la valutazione e la mitigazione del rischio (Fig. 2.1). La prima di queste tre fasi, a sua volta, richiede: *i*) la caratterizzazione del pericolo (suscettibilità) associato al processo o ai processi di instabilità di versante (di assegnata tipologia e magnitudo) ricadenti nell'area oggetto di studio; *ii*) l'analisi delle conseguenze attese a una o più categorie di elementi esposti; *iii*) la stima del rischio. Tali attività, che richiedono generalmente la gestione di dati spaziali all'interno di un sistema informativo geografico (GIS), possono essere svolte – in dipendenza dell'estensione dell'area da investigare e degli obiettivi da perseguire – a differenti scale topografiche di riferimento e utilizzando metodi appropriati. Infatti, a seconda della scala di lavoro adottata e delle relative finalità di zonazione (ad esempio informative, consultive, prescrittive, progettuali), l'analisi del rischio può essere qualitativa o quantitativa. Nello specifico, in accordo con quanto proposto da Fell et al. (2008) e richiamato all'interno delle “Linee guida per la progettazione degli interventi di mitigazione del rischio da frana” (AGI-ISPRA, 2022):

- l'*analisi qualitativa del rischio* utilizza scale ordinali, descrittive o numeriche per descrivere l'entità delle potenziali conseguenze e la probabilità che tali conseguenze si verifichino;
- l'*analisi quantitativa del rischio (QRA)* si basa su valori numerici di probabilità, vulnerabilità e conseguenze, e conduce a un valore numerico del rischio.

L'analisi del rischio di tipo qualitativa è generalmente privilegiata nell'ambito di studi da svolgere a media scala (da 1:25.000 a 1:100.000) per finalità consultive e grande scala (da 1:5.000 a 1:25.000) per finalità prescrittive. In accordo con la teoria del rischio, la sua stima passa attraverso l'adozione di formule disponibili nella letteratura scientifica, tra le quali quella maggiormente adottata è stata proposta da Varnes and the International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and other Mass Movements on Slopes (1984), secondo cui:

$$R = P \cdot E \cdot V \quad (2.1)$$

essendo R il rischio, P la pericolosità, E l'esposizione degli elementi a rischio (nel caso delle persone) o il valore ad essi associato (per le rimanenti categorie) e V la loro vulnerabilità.

I metodi implementati per la valutazione delle componenti di rischio utilizzano principalmente indicatori ponderati di tipo multi-criteriale (Castellanos Abella e van Westen, 2007), o matriciale (Cascini et al. 2005), o ancora sistemi a punteggio (Wong, 2005) da applicare a più pendii. I risultati ottenuti, che possono essere presentati in modo proficuo in Carte di zonazione del rischio (Fell et al.,

2008) – facilitano il confronto dei rischi relativi stimati e conducono alla identificazione dei versanti che necessitano attività di *follow-up* (ad esempio, approfondimento delle conoscenze, manutenzione straordinaria, ripristino della funzionalità di opere esistenti), il cui costo deve essere preventivamente valutato (Fell et al., 2005; Wong, 2005).

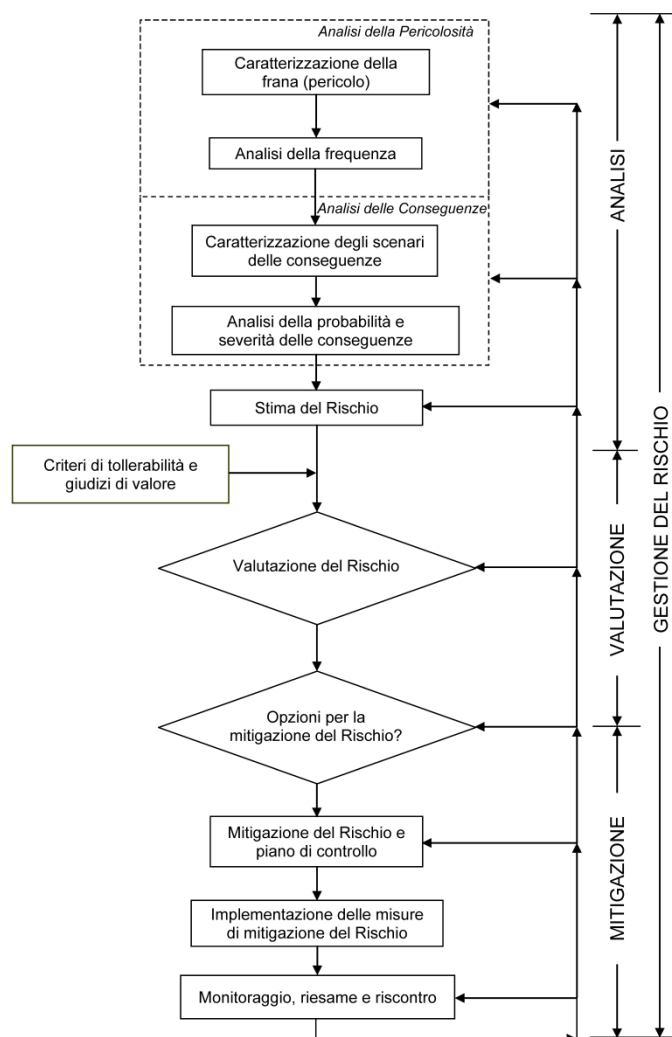


Figura 2.1 - Il processo di gestione del rischio da frana (modificata da Fell et al., 2005).

Vale la pena evidenziare che l'analisi qualitativa del rischio è soggetta a carenze intrinseche, principalmente legate al carattere soggettivo dei metodi adottati (che dipendono in larga misura dall'esperienza e dal tempo dedicato dagli analisti) e dei descrittori (che comportano problemi di percezione e comprensione del livello di rischio atteso). Ciò può provocare difficoltà nello svolgimento di attività di comunicazione del rischio che risultino proficue.

L'approccio quantitativo (QRA), da privilegiare per studi a scala di dettaglio ($> 1:5,000$) volti alla eventuale scelta e dimensionamento degli interventi di mitigazione del rischio, quantifica la probabilità di un dato livello di perdita (relativo a un singolo elemento o a un gruppo di elementi a rischio) e le incertezze associate (Corominas et al., 2014). I metodi volti alla stima quantitativa delle componenti di rischio sono ben descritti nella letteratura scientifica (Wong et al., 1997; Ho et al., 2000; Wong, 2005; Fell et al., 2005; Corominas et al., 2014), sebbene siano ancora da compiere ulteriori sforzi per applicarli a casi di studio reali. A questo proposito, il QRA richiede dati di input geologici e geotecnici più accurati (sia in termini di qualità che di quantità) rispetto a quelli adottati nelle analisi di rischio qualitative, insieme a DEM/DTM ad alta risoluzione e informazioni dettagliate sugli elementi esposti.

I risultati del QRA possono essere presentati in termini di (Fell et al., 2005):

- *rischio annuale*, ovvero perdite economiche attese (€/anno) o probabilità che una determinata persona – ad esempio, quella più esposta – possa perdere la vita (rischio per l'individuo);
- *coppie di valori frequenza-conseguenze (f-N)*, corrispondenti alle probabilità annuali (f) che si verifichino determinate conseguenze (ad esempio la perdita di un numero N di vite);
- *curve F-N*, come quelli che esprimono – sul piano bi-logaritmico – la probabilità cumulativa annua (F) di eventi in grado di determinare perdere N o più vittime sulla base di tutti gli scenari di rischio plausibili.

Nell'ipotesi che le tipologie di fenomeni che generano il rischio totale siano tra loro indipendenti, il rischio per l'individuo può essere calcolato mediante l'espressione (Corominas et al., 2014):

$$P_{(DI)} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[P_{(L)i,j} \times P_{(T:L)i,j} \times P_{(S:T)} \times V_{(D:T)i,j} \right] \quad (2.2)$$

nella quale:

- $P_{(DI)}$ è la probabilità annuale che la persona maggiormente esposta al rischio (dentro un'abitazione o in spazi aperti) possa perdere la propria vita;
- $P_{(L)i,j}$ è la frequenza dell'evento franoso j avente magnitudo (ad esempio, volume) i;
- $P_{(T:L)i,j}$ è la probabilità che l'evento franoso j avente magnitudo i raggiunga l'assegnata persona;
- $P_{(S:T)}$ è la probabilità spazio-temporale della persona maggiormente esposta al rischio;
- $V_{(D:T)i,j}$ è la vulnerabilità della persona maggiormente esposta al rischio all'evento franoso j avente magnitudo i;

essendo n i valori di magnitudo considerati per ciascuno degli m eventi franosi presi a riferimento.

Nel caso di strutture/infrastrutture, l'espressione (2.2) va modificata introducendo al posto di $V_{(D:T)i,j}$ la vulnerabilità della assegnata proprietà nei confronti dell'evento franoso j di magnitudo i ($V_{(prop:S)i,j}$) e considerandone il valore E (ad esempio, in euro).

Si deve osservare che i termini che concorrono all'espressione del rischio su base quantitativa sono affetti da incertezze (di natura epistemica e aleatoria) che richiedono lo svolgimento di analisi di sensitività (Nadim et al., 2005) ovvero di essere quantificate (Macciotta et al., 2016).

Il punto di forza di un'analisi di tipo QRA risiede nella possibilità di quantificare il rischio (piuttosto che esprimerlo in termini relativi come nelle analisi qualitative) ed essere riproducibile, oltre alla possibilità di portare in conto un'ampia gamma di scenari di pericolo plausibili e non solo il caso "peggiore". Infatti, questo tipo di approccio fornisce un supporto coerente per valutare l'accettabilità del rischio e una base comune per stabilire strategie alternative di mitigazione del rischio basate su approcci costi-benefici utili ad ottimizzare la scelta e la progettazione dell'intervento di mitigazione. Per la società, il coinvolgimento nei processi partecipativi contribuisce ad aumentare la consapevolezza dei livelli di rischio esistenti tra le parti interessate (Linnerooth-Bayer et al., 2016) e la valutazione dell'efficacia delle azioni intraprese (Corominas et al. 2014).

Sia che si adotti un approccio tipo qualitativo che quantitativo, il rischio ottenuto deve essere poi – nella seconda fase del processo di gestione del rischio da frana (Fig. 2.1) – “valutato” operando un confronto del suo livello/valore con valori soglia stabiliti mediante criteri di tollerabilità e accettabilità vigenti nell'area di studio. In dipendenza degli esiti di tale confronto, si assumeranno le più opportune decisioni su “se, dove e come” intervenire per la mitigazione del rischio (Fell et al., 2005).

3. NORMATIVE DI SETTORE VIGENTI IN ITALIA

In Italia, le prime normative che affrontarono aspetti relativi ai cosiddetti “rischi idrogeologici” (ovvero associati ad alluvioni e frane) risalgono all’inizio del XX secolo. In particolare, i loro contenuti riguardavano principalmente la gestione della rete fluviale e delle opere idrauliche (Regio Decreto 523/1904) e la difesa del suolo e delle foreste nelle zone montane (Legge 445/1908, Regio Decreto 3267/1923). Tuttavia, all’interno di tali norme erano inibiti interventi e/o utilizzazioni che ne pregiudicassero le condizioni di equilibrio con conseguenze negative sugli elementi esposti.

Il successivo emendamento cardine è rappresentato dalla Legge n. 183 del 18 maggio 1989 che istituisce le Autorità di Bacino e guarda al territorio come un sistema fortemente interconnesso le cui problematiche, per essere affrontate pienamente, devono essere inquadrare in unità fisiografiche appropriate. La successiva Legge n. 493 del 4 dicembre 1993 sancisce l’applicazione dei cosiddetti “Piani di Bacino” volti a tutelare il territorio, riqualificare le risorse idriche e gestirle per un corretto sviluppo economico e sociale, tutelando le problematiche ambientali". Gli stessi Piani possano essere redatti ed approvati anche per sottobacini o per stralci relativi a settori funzionali. Nella stessa prospettiva il Decreto-legge n. 398 del 5 ottobre 1993, mediante il comma 6 ter dell’art.17 della Legge n. 183 del 18 maggio 1989, introduce e definisce il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) come Piano stralcio del Piano di Bacino.

Le attività correlate hanno subito un'accelerazione subito dopo l'emergenza idrogeologica del maggio 1998, quando molteplici frane pluvio-indotte causarono la morte di 160 persone in cinque comuni della Campania (Cascini, 2004). A causa delle enormi conseguenze dell’evento, il Governo Centrale emanò il Decreto-legge n. 180 dell’11 giugno 1998 (il cui Atto di indirizzo e coordinamento corrisponde al Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 29 settembre 1998), noto anche come “Decreto Sarno”, fissando per la prima volta un termine all’adozione dei PAI per la zonazione del rischio residuo nelle aree pedemontane dei territori comunali interessati dai fenomeni sopra menzionati (Cascini et al., 2005), convertito poi nella Legge n. 267 del 3 agosto 1998 che imponeva alle Autorità di Bacino di zonare il rischio idrogeologico e l’adozione dei Piani stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico (PsAI).

La zonazione del rischio e, all’interno dei territori di alcune Autorità di Bacino, la zonazione della pericolosità, è stata inizialmente ottenuta su tutto il territorio italiano per le aree a rischio idrogeologico “molto elevato” per l’incolumità delle persone e per la sicurezza delle infrastrutture e del patrimonio ambientale e culturale ai sensi della Legge 226/1999. Successivamente, la zonazione

della pericolosità e del rischio sono state aggiornate nell'ambito dei cosiddetti Progetti di "Piano di Assetto Idrogeologico" (Legge 365/2000) in conformità alle prescrizioni governative del citato Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 29 settembre 1998. In particolare, queste ultime includono la definizione dei quattro livelli di rischio, zonati utilizzando la cartografia tecnica a scala minima 1:25,000 recante l'inventario delle frane e classificati in base alla gravità delle conseguenze previste in:

- *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;
- *elevato (R3)*: per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità dei medesimi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
- *medio (R2)*: per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- *moderato (R1)*: per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali.

È importante evidenziare che, al fine di stimare i livelli di rischio sopra indicati, sono state fornite istruzioni del tutto generali (Cascini et al., 2005); ciò ha portato all'adozione di approcci metodologici diversi da parte delle Autorità di Bacino, sebbene basati principalmente su procedure fondate sulla conoscenza ovvero euristiche. Solo un numero ridotto di Autorità di Bacino riporta nelle Carte di zonazione anche le classi di pericolosità che, in considerazione della loro rilevanza ai fini della pianificazione territoriale, sono suddivise in funzione delle tipologie di frana e della loro intensità (ISPRA, 2025).

Successivamente all'approvazione dei Piani di Assetto Idrogeologico, si sono susseguiti ulteriori provvedimenti legislativi (anche per tenere conto dei ritardi accumulati da alcune Autorità di Bacino) fino al Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006 che istituisce le Autorità di Bacino Distrettuali alle quali sono demandati i medesimi compiti attribuiti alle sopresse Autorità di Bacino, già istituite con la Legge n. 183 del 18 maggio 1989.

Pur in presenza di un percorso articolato della normativa più recente, i criteri per la gestione del rischio idrogeologico permangono quelli stabiliti dal Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri

del 29 settembre 1998 che, in armonia con i contenuti del primo comma dell'art. 1 del Decreto-Legge n. 180 dell'11 giugno 1998, prevede tre fasi successive per le attività da svolgere, nell'ordine rappresentate da:

- *Fase uno*: individuazione delle aree soggette a rischio idrogeologico attraverso l'acquisizione delle informazioni disponibili sullo stato di dissesto;
- *Fase due*: perimetrazione, valutazione dei livelli di rischio e definizione delle conseguenti misure di salvaguardia;
- *Fase tre*: programmazione della mitigazione del rischio.

Con riferimento all'individuazione e programmazione delle misure e/o degli interventi di mitigazione, nelle aree perimetrate a rischio molto elevato (R4) il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 29 settembre 1998 detta gli indirizzi da seguire in termini di:

- interventi di demolizione senza ricostruzione;
- interventi di manutenzione ordinaria così come definiti alla lettera a) dell'art. 31 della Legge n. 457 del 5 agosto 1978;
- interventi strettamente necessari a ridurre la vulnerabilità degli edifici esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità, senza aumenti di superficie e volume, senza cambiamenti di destinazione d'uso che comportino aumento del carico urbanistico;
- interventi necessari per la manutenzione ordinaria e straordinaria di opere pubbliche o di interesse pubblico;
- opere di bonifica e sistemazione dei movimenti franosi.

Nelle aree perimetrate a rischio elevato (R3), oltre agli interventi ammessi per l'area a rischio molto elevato (R4), sono consentiti:

- interventi di manutenzione straordinaria, restauro, risanamento conservativo, così come definiti alle lettere b) e c) dell'art. 31 della Legge n. 457 del 5 agosto 1978, senza aumento di superficie o volume, interventi volti a mitigare la vulnerabilità dell'edificio;
- interventi di ampliamento degli edifici esistenti unicamente per motivate necessità di adeguamento igienico-sanitario.

Per quanto riguarda le aree classificate a rischio medio (R2) e moderato (R1), come pure per le aree classificate a differenti livelli di pericolosità (P), il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 29 settembre 1998 non fornisce indicazioni specifiche, lasciando di fatto libere le Autorità di Bacino (nazionali, interregionali e regionali) di cui alla Legge 183/89 di stabilire le Norme di Attuazione nel pieno rispetto delle normative vigenti, inclusa quella tecnica come l'aggiornamento

delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2018) o norme europee (Eurocodici), che forniscono linee di indirizzo e criteri per la progettazione delle opere civili, comprese quelle di stabilizzazione dei pendii.

Vale la pena osservare che le Carte ufficiali di zonazione del rischio, prodotte congruentemente con una zonazione delle aree a rischio di tipo qualitativo, sono a livello preliminare (Fell et al., 2008). Di conseguenza, rappresentano un prezioso strumento predittivo per i decisori (ad esempio, Enti locali o regionali) responsabili della prevenzione del rischio mediante interventi non strutturali, inclusi i sistemi di allertamento (De Chiara et al., 2015). Inoltre, insieme alle relative norme attuative, sono giuridicamente vincolanti per le pubbliche amministrazioni responsabili della pianificazione territoriale e per i proprietari privati. Al contrario, tali Carte di zonazione non sono adatte (Ferlisi et al., 2016): *i*) alla definizione delle priorità di aree a rischio egualmente classificate che necessitano di interventi di mitigazione e alla relativa destinazione delle risorse finanziarie, e *ii*) alla selezione della strategia di riduzione del rischio più appropriata (inclusa la tipologia, l'ubicazione e le dimensioni delle opere di prevenzione e/o protezione, nei casi in cui siano necessarie). Questi aspetti richiedono di essere affrontati attraverso analisi quantitative del rischio da effettuare a scala di dettaglio ($> 1:5,000$) nelle porzioni di territorio inizialmente individuate come maggiormente a rischio all'interno di un'unità territoriale/amministrativa più ampia (ad esempio, bacino idrografico, regione o provincia).

4. CATEGORIE DI INTERVENTI

Una volta che il rischio è stato stimato, lo stesso deve essere valutato per accertarne o meno la accettabilità o tollerabilità (Fell et al., 2005). A tal riguardo, è accettabile un rischio che, per ragioni di vita o di lavoro, la società è pronta ad accettare così per come esso è senza alcun riguardo alla sua gestione (generalmente la società considera come non giustificabili le spese necessarie all'ulteriore riduzione di tale rischio). D'altra parte, è tollerabile l'intervallo di rischio con il quale la società è disposta a convivere in modo da garantire a sé stessa determinati benefici netti (tale intervallo appare come non trascurabile e necessita di essere aggiornato e ulteriormente ridotto, laddove possibile). In presenza di una scala ordinale di differenziazione dei livelli di rischio, qual è quella adottata in Italia, il rischio tollerabile corrisponde a quello accettabile ed entrambi coincidono con il rischio medio (R2); ovvero per il quale (o al di sotto del quale) non sono da attendersi conseguenze sulle persone esposte (v. anche il Cap. 7). In altre parole, le aree perimetrate a rischio molto elevato (R4) e elevato (R3) sono quelle che richiedono prioritariamente la riduzione del rischio a un livello compatibile con la sua accettabilità/tollerabilità ($\leq R2$), con l'obiettivo primario di garantire la salvaguardia della vita umana (D.P.C.M. del 29 settembre 1998).

A tal fine si può ricorrere a interventi di mitigazione di tipo non strutturale o strutturale (Fig. 4.1), comunque accompagnati da serie campagne di informazione – se non anche di condivisione secondo logiche proprie dei processi partecipati (Linnerooth-Bayer et al., 2016) – rivolte a tutti i portatori di interesse. Rientrano negli interventi non strutturali quelli basati su sistemi di allerta per la riduzione dell'esposizione delle persone a rischio. Sono, invece, annoverabili tra gli interventi strutturali quelli volti alla riduzione della pericolosità del generico fenomeno franoso ovvero della vulnerabilità degli elementi esposti al rischio (in particolare, di quelli appartenenti all'ambiente costruito). Focalizzando l'attenzione sugli interventi volti alla riduzione della pericolosità, realizzati con materiali artificiali, questo obiettivo può essere perseguito mediante la riduzione della probabilità di accadimento di frane di primo distacco che possono propagarsi con una cinematica rapida (prevenzione) ovvero della probabilità che le stesse possano raggiungere gli elementi esposti al rischio, intercettandone il percorso (protezione). Laddove le frane siano esistenti, la riduzione della pericolosità avviene attraverso la stabilizzazione delle masse spostate tipicamente caratterizzate da una cinematica lenta (prevenzione).

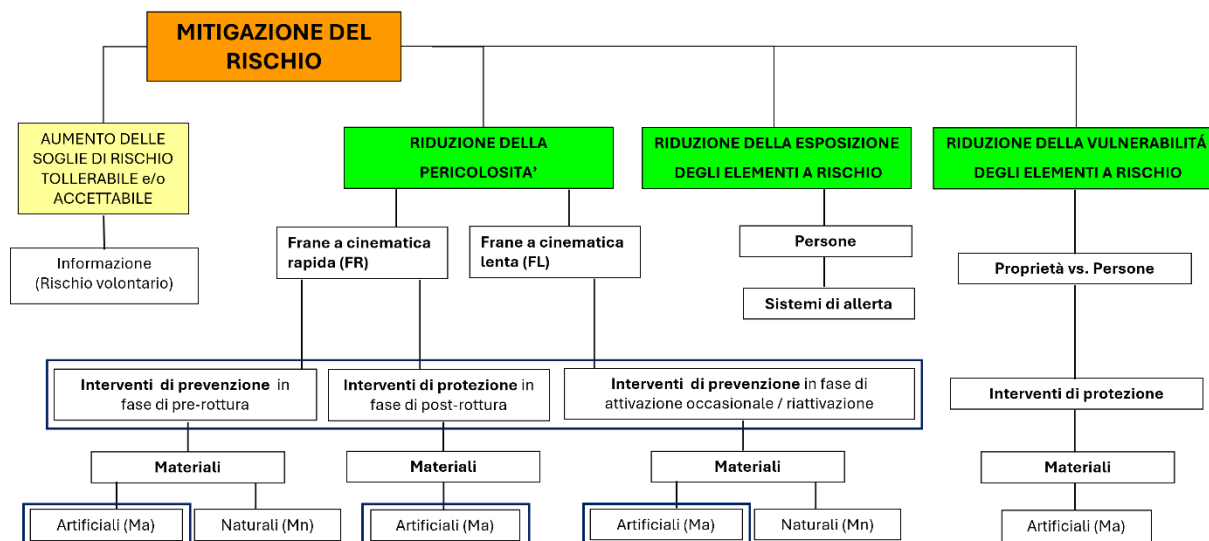


Figura 4.1 - Tipologie di interventi di mitigazione del rischio. All'interno dei riquadri blu si rinviengono quelle particolarmente attenzionate nelle presenti Linee Guida, unitamente ai materiali costituenti.

La scelta della strategia più opportuna da utilizzare per conseguire un’effettiva riduzione del livello di rischio dipende da numerosi fattori. Tra questi, va preliminarmente considerata la scala da utilizzare ai fini dell’analisi e della zonazione del rischio da frana.

Facendo riferimento alle scale individuate dal JTC-1 (Fell et al., 2008), si osserva infatti che la maggior parte delle strategie di mitigazione del rischio può essere utilizzata alle diverse scale della zonazione, perseguendo naturalmente obiettivi diversi. Viceversa, le strategie mirate alla riduzione della pericolosità, mediante opere di stabilizzazione dei versanti o della vulnerabilità degli elementi esposti, risultano applicabili soltanto se gli studi si svolgono con un significativo grado di dettaglio (Tabella 4.1). Infatti, esclusivamente a scala di dettaglio, sono disponibili i necessari dati di input per il loro dimensionamento e che riguardano i fattori predisponenti, le cause innescanti e i meccanismi che ne regolano le fasi di innesco e di propagazione (Cascini e Sorbino, 2003).

Tabella 4.1 Strategia di mitigazione del rischio alle diverse scale di zonazione del rischio da frana (mod. da Sorbino, 2007).

SCALA STRATEGIA	Piccola ($< 1:100.000$)	Media (da $1:100.000$ a $1:25.000$)	Grande (da $1:25.000$ a $1:5.000$)	di Dettaglio ($\geq 1:5.000$)
Aumento delle soglie di rischio accettabile	SI	SI	SI	SI
Riduzione della pericolosità	NO	NO	NO	SI
Riduzione dell'esposizione	SI	SI	SI	SI
Riduzione della vulnerabilità	NO	NO	NO	SI

In molte situazioni, infine, l'obiettivo della riduzione del livello di rischio da frana in una determinata area non può essere raggiunto mediante l'adozione di una specifica strategia di intervento in un limitato periodo di tempo, ma piuttosto utilizzando con razionalità e buon senso strategie e tecniche differenti, sia strutturali e sia non strutturali. Un esempio in tal senso è fornito dalla *“individuazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio nei territori dei Comuni campani colpiti dall'evento del 5 maggio 1998”* e dalla *“redazione delle relative linee di indirizzo per le successive progettazioni”* redatte da un'apposita Commissione istituita dall'Unità Operativa 2.38 del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del CNR (Cascini, 2004; 2005), alla quale detto compito era stato affidato nelle fasi immediatamente successive a quelle che avevano condotto alla redazione della *“Carta del Rischio Residuo”* nei territori degli stessi Comuni.

In particolare, gli interventi strutturali furono articolati secondo tre fasi distinte, come qui di seguito indicato:

- *Interventi di I Fase*
 - ripristino della rete drenante all'interno delle aree a rischio;
 - manutenzione straordinaria della rete drenante all'esterno delle aree a rischio;
 - eliminazione del pericolo imminente.
- *Interventi di II Fase*
 - adeguamento della rete drenante all'interno delle aree a rischio.
- *Interventi di III Fase*
 - realizzazione di opere sia strutturali che non strutturali finalizzate alla mitigazione del rischio.

Gli interventi strutturali della III fase furono distinti in opere di difesa attiva (ovvero di prevenzione) e opere di difesa passiva (ovvero di protezione) in ragione degli obiettivi che si intendevano perseguire, in accordo con le definizioni in precedenza date (Tabella 4.2 e Figura 4.2).

Fin dall'inizio, la definizione di tali interventi apparve, tuttavia, non perseguibile nei ristretti tempi concessi, per la rilevante estensione del territorio e il non approfondito livello delle conoscenze sui fattori predisponenti e le cause innescanti la franosità, oltre che sui meccanismi di innesco, di propagazione e di evoluzione delle colate rapide di fango. La Commissione si limitò, pertanto, ad individuare le tipologie dei possibili interventi di mitigazione ed a redigere Linee Guida per la fase progettuale, rimandando ai progettisti l'acquisizione delle informazioni necessarie per il dimensionamento delle opere.

Tabella 4.2 Opere di difesa attiva e passiva previste nel piano degli interventi (da Cascini, 2005).

Opere di difesa attiva	Difese estensive di sistemazione idraulico-forestale dei versanti
	Opere di drenaggio
	Difese semi-intensive di sistemazione idraulica dei valloni
	Opere di trattenuta e contenimento (muri, argini, briglie, etc.)
	Opere di deviazione
Opere di difesa passiva	Opere di intercettazione (briglie di fondovalle, dighe permeabili, etc.)
	Opere di convogliamento (canali artificiali)
	Opere di sedimentazione ed accumulo (bacini di espansione)

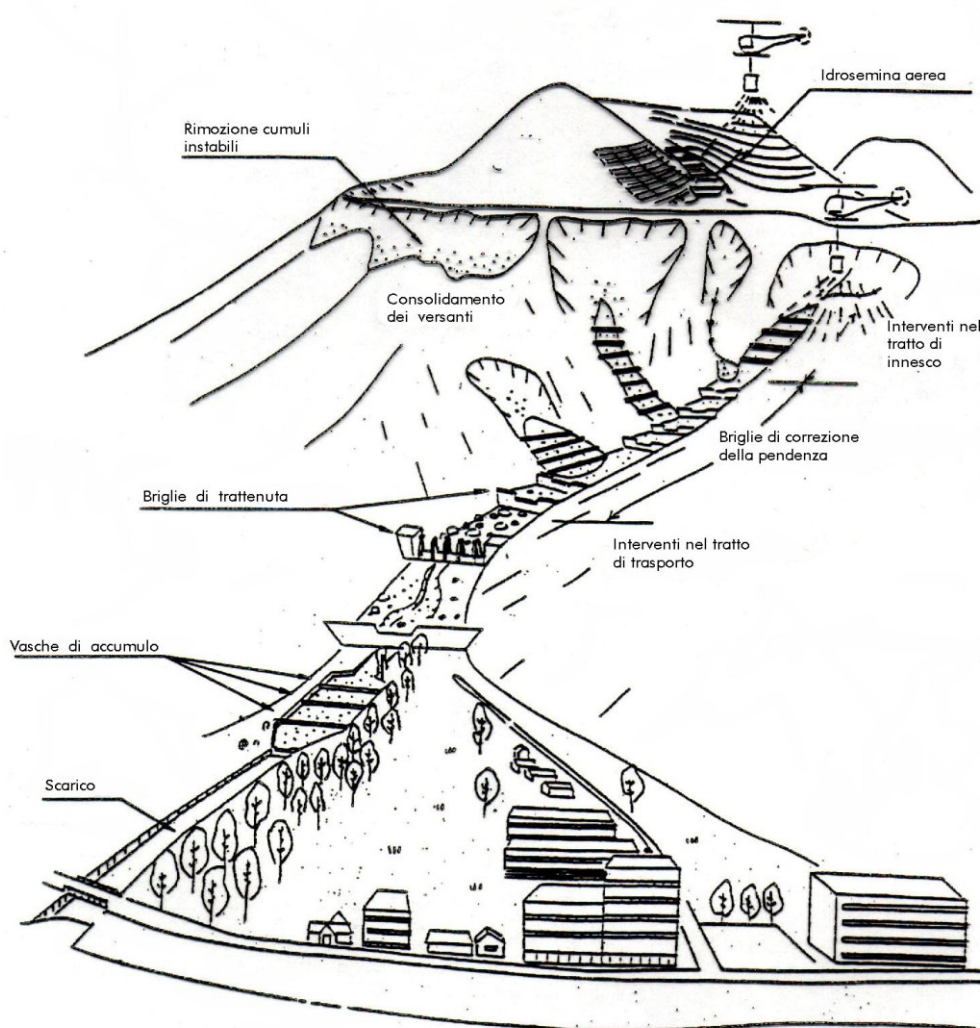


Figura 4.2 Rappresentazione grafica delle opere di difesa attiva e passiva previste nel piano degli interventi (da Cascini, 2005).

Il prosieguo del presente Capitolo focalizza l'attenzione sugli interventi strutturali sia di prevenzione sia di protezione; si forniscono, quindi, gli elementi essenziali per un inquadramento degli interventi non strutturali che si avvalgono dell'impiego di strumentazione di monitoraggio.

4.1. Interventi di prevenzione

Gli interventi definiti di prevenzione, come in precedenza detto, sono finalizzati a una riduzione della probabilità di accadimento delle frane. Essi includono gli interventi di stabilizzazione volti a cogliere uno o più dei seguenti obiettivi (Ho, 2004):

- ridurre le forze instabilizzanti;
- aumentare le forze resistenti;
- incrementare la resistenza interna del materiale.

Tra le azioni volte a una diminuzione delle forze instabilizzanti vanno considerate:

- quelle indirizzate a ridurre la resistenza mobilitata (domanda) lungo la superficie di scorrimento;
- quelle che mirano ad un trasferimento delle azioni ad elementi fondati od ancorati in porzioni di terreno o di roccia stabili.

Le prime sono sostanzialmente rappresentate dall'eliminazione di volumi di roccia o terreno instabili (ad esempio, mediante il disgaggio di blocchi) ovvero attraverso la riprofilatura del versante con alleggerimento del corpo di frana nella sua parte superiore, mediante rimozione parziale del terreno accompagnata, eventualmente, dalla formazione di un rilevato al piede (Hutchinson, 1977).

Nel secondo gruppo (Fig. 4.3) rientrano varie opere di sostegno (muri a gravità in pietrame o in calcestruzzo; muri a mensola in calcestruzzo eventualmente tirantati, controventati o fondati su pali; paratie e cortine di pali e micropali; terre armate) e gli interventi finalizzati al rinforzo del terreno, quali chiodature non pretese e terre armate (Fig. 4.4).

Un rigoroso dimensionamento di tali opere è, di norma, subordinato all'analisi delle complesse interazioni che si stabiliscono tra struttura e terreno in posto (v. Cap. 6). Ad ogni buon conto, appare doveroso segnalare il sempre più diffuso utilizzo delle opere flessibili o ad inerzia trascurabile (quali si configurano i micropali) probabilmente per l'agevole impiego dei mezzi d'opera nelle zone d'inscavo caratterizzate da sfavorevoli condizioni di accesso (Cascini e Sorbino, 2003). Si citano, infine, i *soil nails* (Di Fonzo, 2008), consistenti in barre metalliche opportunamente protette dalla corrosione, il cui impiego è particolarmente frequente nel territorio di Hong Kong su imponenti rilevati artificiali la cui principale causa di instabilità è attribuita a fenomeni di liquefazione statica (Sun, 1998).

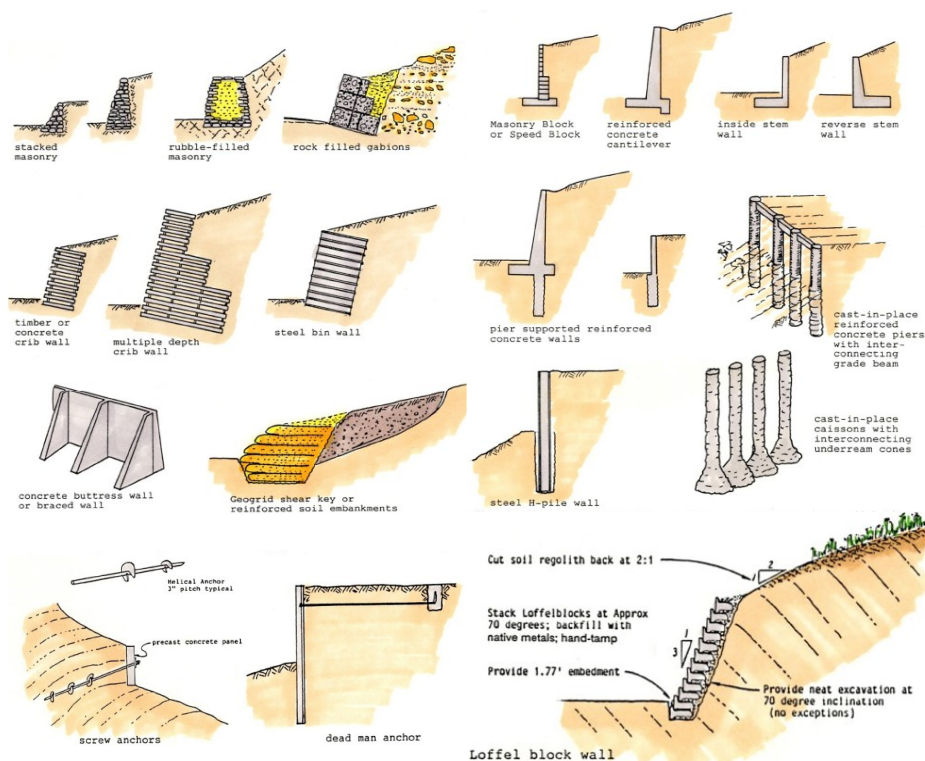


Figura 4.3 – Esempi di strutture di sostegno e terre armate (da Rogers, 1992).

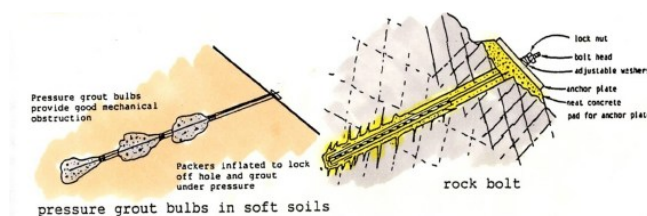


Figura 4.4 – Esempi di rinforzo del terreno (da Rogers, 1992).

Nel novero degli interventi volti all'incremento della resistenza disponibile (capacità) lungo la superficie di scorrimento possono farsi rientrare varie tipologie di opere tra cui:

- gli interventi di rinforzo del terreno;
- gli interventi di ingegneria naturalistica;
- i drenaggi;
- il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno.

Gli interventi di rinforzo del terreno consistono essenzialmente nella messa in opera di elementi presollecitati a cui è affidato il compito di aumentare le tensioni totali ed efficaci agenti normalmente alla superficie di scorrimento.

Agli interventi di ingegneria naturalistica viene affidata una duplice funzione: idrologica e meccanica. Da un lato, infatti, la vegetazione, tramite le foglie, protegge la superficie del versante dall'impatto delle gocce di pioggia e, per mezzo delle radici, sottrae acqua al terreno, diminuendone il grado di saturazione con conseguente aumento dei valori di suzione e miglioramento delle condizioni di stabilità. D'altro lato, le radici determinano un aumento della resistenza al taglio dei terreni (assimilabile ad un aumento dell'aliquota coesiva) direttamente proporzionale al numero di radici presenti (Fig. 4.5).

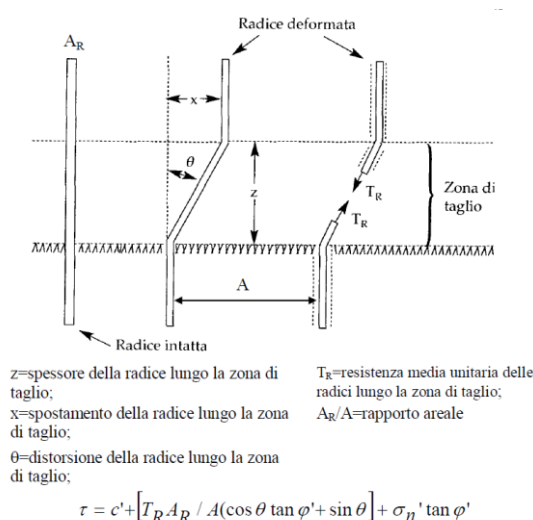


Figura 4.5 – Modello per la determinazione della resistenza al taglio del complesso radici-terreno (mod. da Gray e Leiser, 1982).

Le opere di drenaggio, superficiali/profonde (Fig. 4.6), sono tra le più efficaci e maggiormente utilizzate in quanto consentono una diminuzione del peso del terreno e, soprattutto, un incremento dello stato tensionale efficace. I drenaggi superficiali (canalette, cunette, fossi di guardia, collettori) vengono di solito realizzati contestualmente ad altri interventi e hanno lo scopo di limitare l'infiltrazione delle acque nel sottosuolo regimentando le acque di ruscellamento. I drenaggi profondi hanno una grande efficacia, ma comportano un maggiore impegno a livello progettuale ed esecutivo. Lo scopo principale è quello di abbattere il livello piezometrico attraverso varie soluzioni: trincee, pozzi verticali, gallerie drenanti e dreni sub-orizzontali.

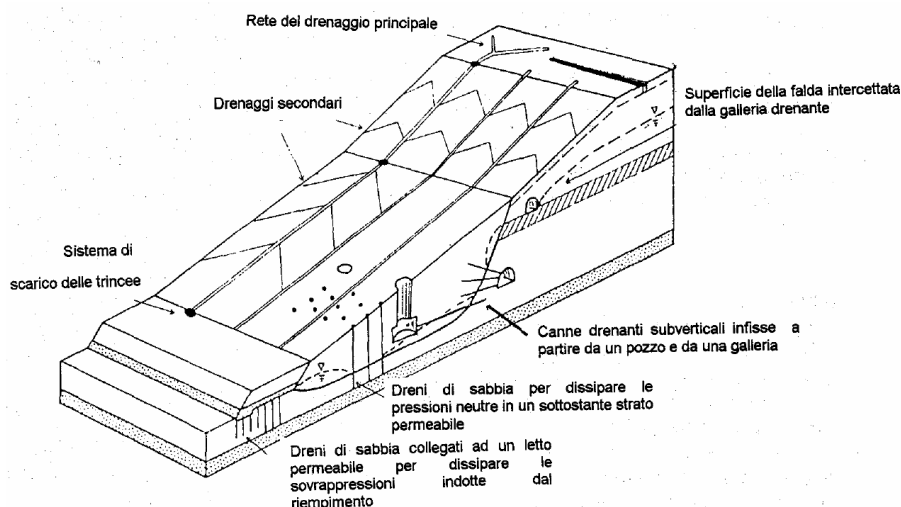


Figura 4.6 – Schemi di drenaggi nei pendii naturali (da Evangelista, 1997).

L'importanza del ruolo giocato dalla presenza di una zona di parziale saturazione sul dimensionamento, in particolare, di trincee e dreni sub-orizzontali è stata messa in luce da Burghignoli e Desideri (1986) che hanno condotto uno studio sull'efficienza di alcuni sistemi drenanti contemplando le condizioni di parziale saturazione del mezzo. I risultati conseguiti (Fig. 4.7) evidenziano come tali condizioni comportino valori dell'efficienza che si discostano notevolmente da quelli calcolati nell'ipotesi di saturazione del mezzo.

Analisi numeriche sull'efficacia dei tubi drenanti in terreni parzialmente saturi sono state condotte da Rahardjo e Leong (2002), con l'ausilio di un codice di calcolo agli elementi finiti. I risultati conseguiti hanno evidenziato che tale sistema consente un mantenimento delle condizioni di stabilità del pendio solo nel caso di risalita della superficie libera della falda, la cui escursione viene controllata dalla quota dei dreni; viceversa, la presenza o meno dei dreni appare irrilevante nei riguardi della variazione del regime delle pressioni neutre conseguente all'infiltrazione delle acque meteoriche.

Nel caso di coltri piroclastiche sede di fenomeni di primo distacco in condizioni di parziale saturazione, tali sistemi appaiono, quindi, utilizzabili al meglio laddove immissioni idriche dal sottostante basamento ne condizionino l'innescò. Un esempio in tal senso è offerto dal ricorso, nelle coltri di alterazione di origine granitica e/o vulcanica del territorio di Hong Kong, a trincee drenanti ubicate sulla sommità del pendio la cui funzione è quella di intercettare le falde sospese, temporanee o permanenti, che si formano al contatto tra terreni di alterazione e substrato meno alterato, a seguito di intensi eventi meteorici (Lumb, 1975; Anderson e Howes, 1985; GCO, 1984).

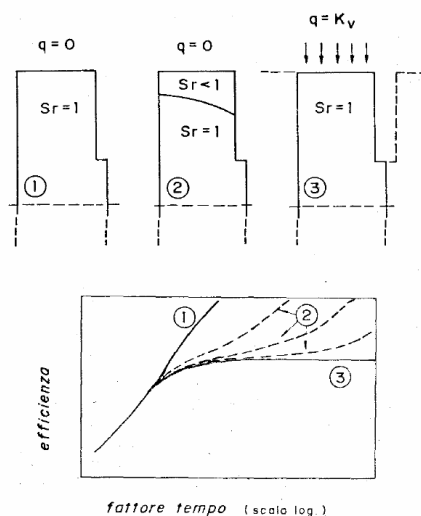


Figura 4.7 – Influenza delle condizioni di parziale saturazione sull'efficienza nel tempo di un sistema di trincee drenanti (da Burghignoli e Desideri, 1986).

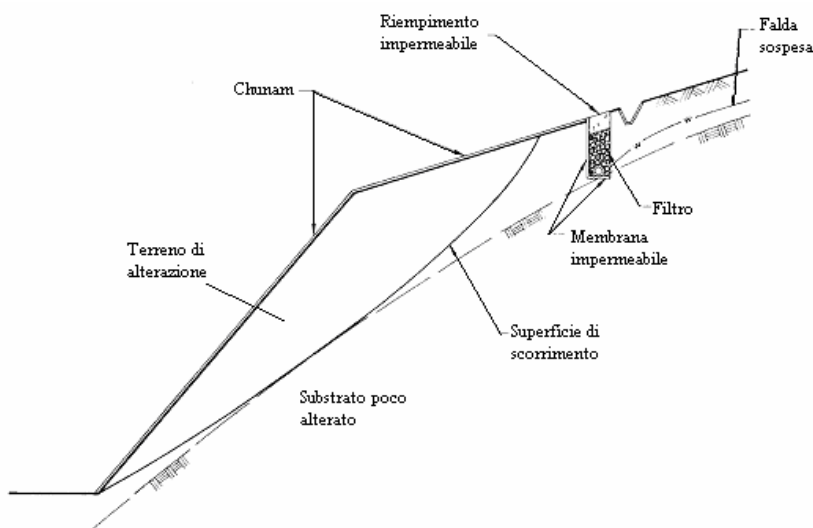


Figura 4.8 – Trincee drenanti realizzate nei pendii artificiali di Hong Kong per l'intercettazione di falde sospese (modificata da GCO, 1984).

Infine, il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno può essere ottenuto mediante interventi di iniezioni di miscele chimiche (ad esempio, stabilizzazione a calce), compattazione di materiale sciolto suscettibile di liquefazione, *grouting* (consolidamento mediante iniezione di cemento) e formazioni di trincee al piede del pendio successivamente riempite di materiale granulare compattato, eventualmente protetto da un geotessile.

4.2. Interventi di protezione

Gli interventi di protezione diminuiscono la probabilità di interazione di una frana con un dato elemento a rischio senza, tuttavia, modificarne la probabilità di accadimento. Nella pratica corrente tali interventi sono di norma utilizzati per mitigare il rischio associato a frane di primo distacco, quali crolli e colate/valanghe di detrito.

Questi interventi possono essere finalizzati:

- al controllo della direzione del flusso;
- alla dissipazione dell'energia posseduta dal materiale in frana;
- all'aumento di resistenza degli elementi vulnerabili.

Appartengono al primo gruppo le opere di diversione e quelle laterali (Fig. 4.9), generalmente impiegate nel caso di colate di detrito (Van Dine, 1996). Le prime sono costituite da muri e rilevati posizionati in modo tale da canalizzare il percorso del flusso di materiale instabile. Sono collocati il più vicino possibile al confine estremo della naturale area di deposizione del flusso in modo da massimizzarne l'estensione. Devono essere progettati in modo tale da non essere scavalcati dal flusso e da sopportarne l'impatto dinamico.

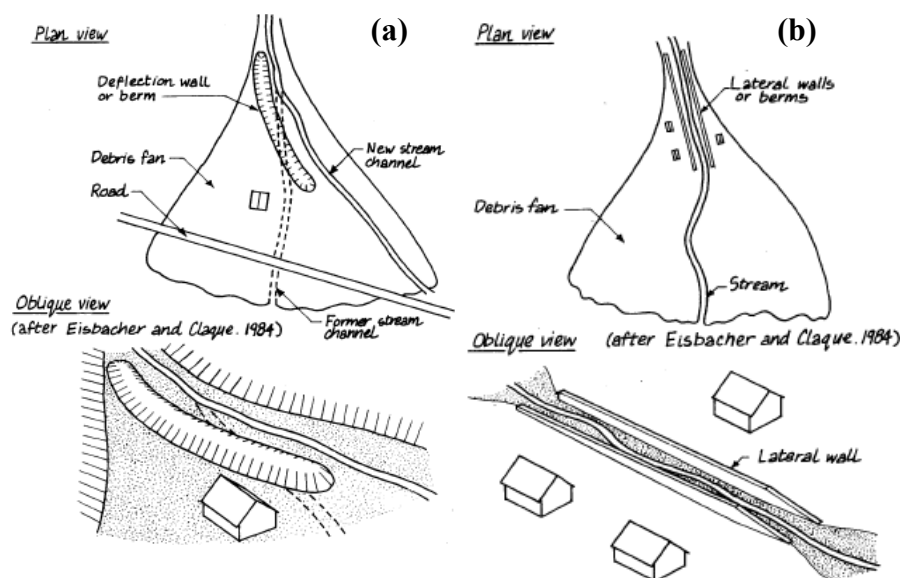


Figura 4.9 – Esempi di strutture per il controllo della direzione del flusso: (a) berma di diversione e (b) muri laterali (da Van Dine, 1996).

I muri laterali e i cunettoni vengono realizzati, oltre che per canalizzare il flusso entrante o uscente dai bacini di deposizione, anche per consentire il transito del flusso incanalato attraverso centri abitati qualora, per motivi di spazio, non sia possibile contenere la colata a monte. Dati gli elevati sforzi tangenziali cui sono sottoposti, le pareti di questi canali vengono usualmente rivestite di calcestruzzo o pietrame.

Piuttosto numerosi sono gli interventi di protezione volti a una diminuzione dell'energia posseduta dal materiale instabile. Per i fenomeni di crollo possono considerarsi i valli, le barriere e le reti paramassi (in aderenza o non). I valli sono interventi relativamente economici ed efficaci, a condizione di avere lo spazio sufficiente per la loro realizzazione al piede del pendio. Le reti paramassi ad alta capacità di assorbimento devono questa caratteristica alla elasticità della loro struttura. Esistono numerose tipologie di barriere paramassi, in gabbioni o in blocchi di cemento, ma anche in terra e in terra rinforzata. La loro funzione è quella di formare un vallo con parete verticale che ostacola e blocca i massi rocciosi. Le barriere sono particolarmente efficaci al piede di pendii non particolarmente acclivi ove il moto dei blocchi avviene soprattutto per rotolamento. Tra le opere di protezione passiva nei riguardi dei fenomeni di crollo vanno anche citate le reti in aderenza che vengono applicate direttamente alla parete rocciosa e le gallerie paramassi che trovano la loro applicazione nella difesa di strutture lineari quali strade e ferrovie (Fig. 4.10).



Figura 4.10 – Esempi di protezione contro il rischio di caduta massi: (a) reti paramassi (da Lo, 2000) e (b) galleria paramassi (da Calveti e di Prisco, 2007)

In relazione ai fenomeni di colata, al fine di dissiparne l'energia, si realizzano interventi che favoriscono la deposizione finale del materiale mobilitato, quali i rilevati, le barriere terminali e i bacini di espansione (Fig. 4.11). Quest'ultimi sono ottenuti dalla combinazione delle opere di diversione e dei rilevati terminali, ma possono anche essere ottenuti mediante scavi predisposti per accogliere tutto o parte del materiale in frana. All'interno di questi bacini e in corrispondenza del canale centrale sono posizionate briglie selettive aventi lo scopo di intercettare e trattenere il materiale più grossolano, separandolo dalla fase liquida (Fig. 4.12). L'effetto dissipativo può essere notevolmente incrementato facendo uso di strutture di impedimento al flusso quali "baffles" e "cell dams".

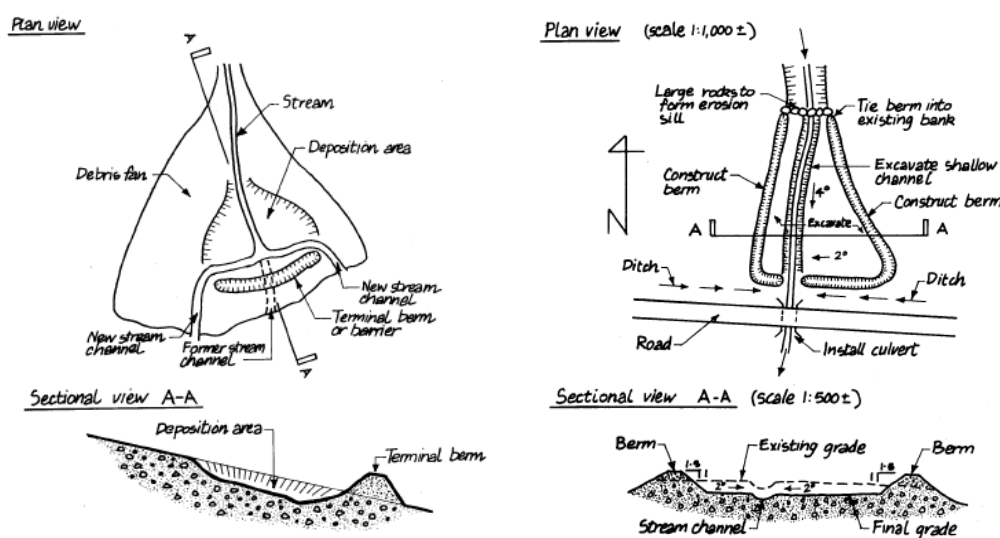


Figura 4.11 – Esempi di bacini di espansione (da Van Dine, 1996).

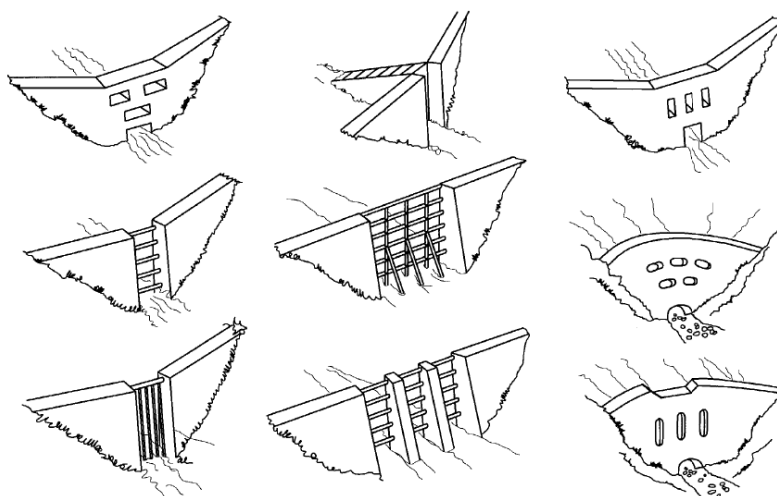


Figura 4.12 – Schemi di briglie selettive (da Lo, 2000).

Nei casi, infine, in cui non si possa evitare che alcune tipologie di elementi a rischio, come gli edifici, siano investiti dal flusso del materiale in frana è possibile ricorrere a interventi strutturali di protezione che riducono la vulnerabilità degli elementi esposti mediante: *i)* l'utilizzo di adeguate tipologie strutturali nel caso di nuovi edifici; *ii)* il consolidamento degli edifici esistenti (Faella e Nigro, 2003). Nel caso degli edifici di nuova costruzione è necessario adottare tipologie strutturali in grado di minimizzare la superficie di interazione con la colata (ad esempio, costruzioni su pilotis) e verificare che gli elementi strutturali resistano alle sollecitazioni derivanti dall'impatto con il materiale in frana. L'efficacia dell'intervento è subordinata alla capacità della struttura, nel suo complesso, di resistere alle azioni derivanti dalla spinta esercitata dalla colata.

Gli interventi di consolidamento consistono nel rinforzo di alcuni elementi strutturali o non strutturali (ad esempio, le pareti perimetrali portanti di edifici in muratura o le pareti di tamponamento esterno di strutture intelaiate in calcestruzzo armato) in modo da renderli capaci di resistere alle azioni che derivano dalla loro interazione con la colata.

4.3. Interventi non strutturali basati sul monitoraggio strumentale

Il monitoraggio dei pendii rappresenta un mezzo fondamentale di approfondimento delle conoscenze sull'evoluzione morfologica del territorio e, quindi, di aggiornamento in continuo della classificazione della suscettibilità, della pericolosità e del rischio. Se adeguatamente integrato con attività di presidio territoriale, il monitoraggio rappresenta, inoltre, un'attività fondamentale per la raccolta di elementi utili alla individuazione dei più idonei interventi di mitigazione del rischio di tipo strutturale e non strutturale.

Per essere proficuo, il monitoraggio si deve basare su una dettagliata cartografia di base oltre che su strumentazione di adeguate caratteristiche in grado di misurare con elevata precisione grandezze nel seguito definite come “indicatori” (intensità di pioggia, livelli piezometrici in punti significativi del sottosuolo, spostamenti superficiali e profondi di coltri instabili o a rischio di frana, apertura di fratture e fessure, stati di sforzo sulle strutture presenti nelle aree a rischio, ecc.), mediante i quali è possibile tenere sotto controllo sia le azioni che si configurano quali cause innescanti l'instabilità e sia il comportamento dei versanti nel loro complesso. Evidentemente la configurazione del sistema di monitoraggio, in termini anche di tipologia degli strumenti di misura da impiegare, discende dalla scala di lavoro e dall'estensione dell'area da tenere sotto controllo. Più precisamente, su area vasta e a piccola/media scala (1:100.000 ÷ 1:25.000) occorre far ricorso a reti di sistemi di misura a terra – i

cui dati è opportuno trasferire in tempo reale a sale di controllo – ovvero a sistemi, come quelli che si appoggiano a costellazioni di satelliti, che si avvalgono di tecnologie avanzate. In area di ridotta estensione ed a scala grande (1:5.000) o di dettaglio (1:2.000), torna indispensabile l'impiego di apparecchiature in grado di rilevare puntualmente i valori assunti dagli specifici indicatori che intervengono nella frana monitorata.

La conoscenza della distribuzione nello spazio e nel tempo degli indicatori concorre, a sua volta, alla calibrazione di parametri che intervengono all'interno di modelli matematici di previsione, nonché alla messa a punto di sistemi di prevenzione basati, solitamente, sulla definizione di “valori soglia” di alcuni di detti indicatori o di altre grandezze a questi correlate.

In genere, i sistemi di previsione e prevenzione prevedono, a tutela della pubblica e privata incolumità, l'adozione di sistemi di allerta e di allarme. L'allerta è indicativa di uno scenario di aggravamento possibile del rischio e impone: un accrescimento della sorveglianza; il controllo continuo della situazione corrente da parte di specialisti; il coinvolgimento degli organi responsabili della sicurezza. L'allarme è il segnale che annuncia l'esistenza di un pericolo imminente e che avvia l'esecuzione delle misure di salvaguardia.

L'adozione di sistemi di allerta o di allarme per essere efficace deve necessariamente basarsi sulla misura puntuale di alcuni indicatori di evento caratteristici dei fenomeni in atto e che si ritiene ne controllino l'evoluzione. Tali sistemi sono indispensabili in tutte le situazioni nelle quali non è possibile la delocalizzazione degli insediamenti e delle infrastrutture e non sono stati ancora realizzati gli interventi strutturali di mitigazione del rischio.

Gli elementi salienti di un idoneo sistema di previsione e prevenzione da frane di primo distacco pluvio-indotte che evolvono sottoforma di colata sono qui di seguito delineati per gli aspetti di monitoraggio strumentale, di modellistica e di controllo visivo del territorio qual è quello che può essere proficuamente operato dal Presidio Territoriale.

4.3.1. Sistemi di monitoraggio e modelli a supporto dei dati sperimentali

La messa a punto di un sistema di monitoraggio in aree potenzialmente sede di fenomeni di primo distacco, che successivamente evolvono in colate rapide di fango, richiede la preliminare acquisizione di approfondite conoscenze sulla morfologia dei luoghi, sulle proprietà meccaniche dei terreni, sul regime delle pressioni interstiziali, sulle proprietà reologiche delle masse in movimento.

La possibilità di prevedere l'inscasso di un fenomeno di flusso rapido pone, tuttavia, problemi di

rilevante portata, la cui risoluzione non può che essere perseguita attraverso l'azione sinergica tra specialisti di diversi settori disciplinari, tra i quali si citano l'Ingegneria Geotecnica, le Scienze Geologiche e l'Ingegneria Idraulica. Un'azione combinata e adeguatamente programmata tra gli specialisti dei primi due settori può, infatti, concorrere alla messa a punto di un idoneo modello di evoluzione dei versanti che risulta spesso determinante nella comprensione e previsione dei fenomeni che presiedono alla fase di innesco dei fenomeni di instabilità.

A loro volta, le analisi idrologiche di serie storiche di dati di pioggia concorrono alla valutazione del periodo di ritorno di eventi estremi che possono causare l'innesco dei fenomeni franosi; tali modelli risultano, in genere, molto utili se opportunamente calibrati su eventi significativi occorsi nel passato. Il corretto e proficuo utilizzo dei modelli innanzi citati richiede necessariamente un'accurata misura degli indicatori di evento, tra i quali di particolare importanza sono l'intensità di pioggia, il regime della suzione, il contenuto d'acqua/umidità del suolo che risultano nella maggior parte dei casi tutti fortemente correlati tra loro.

Indipendentemente dalle tecniche di misura che si intende utilizzare, ampiamente discusse nelle Linee Guida SNPA (2021) a cui si rimanda, è doveroso sottolineare che la realizzazione di una rete di monitoraggio strumentale richiede un apposito progetto che precisi e giustifichi l'estensione dell'area da tenere sotto controllo, il tipo, il numero e il layout degli strumenti, oltre che la frequenza e le modalità delle misure. Il progetto deve essere redatto da un professionista di comprovata qualificazione e deve essere affidato, per la parte realizzativa, a Ditte che vantano una notevole esperienza nel settore.

I dati sperimentali derivanti dal monitoraggio possono, quindi, essere proficuamente utilizzati per la previsione, con idonei modelli, di fenomeni di primo distacco essenzialmente causati da eventi pluviometrici critici che, in alcuni casi, modificano significativamente il regime delle pressioni interstiziali e, in altri, originano fenomeni erosivi di rilevante entità (Cascini et al., 2014).

Con riferimento agli effetti indotti sul regime delle pressioni interstiziali, possono utilizzarsi diversi approcci che trascurano (modelli a scatola chiusa) o portano in conto (modelli completi di versante) i fenomeni fisici che avvengono nei pendii (Cascini e Versace, 1986).

Rientrano nella cosiddetta categoria dei modelli a scatola chiusa i modelli idrologici che mirano alla individuazione di legami funzionali di natura empirica in grado di relazionare i parametri caratterizzanti gli eventi pluviometrici con la probabilità di accadimento di fenomeni franosi.

I modelli completi di versante si pongono come principale obiettivo la simulazione dei fenomeni fisici connessi ai moti di filtrazione che si instaurano nei versanti come conseguenza dell'alimentazione

degli acquiferi da parte degli eventi meteorici. Da un punto di vista concettuale questi modelli forniscono la possibilità di mettere in relazione il regime delle pressioni interstiziali con gli eventi meteorici e, in altre parole, di valutare il ruolo giocato da quest'ultimi sulla instabilità dei versanti (Fig. 4.13). Ovviamente, l'applicazione dei modelli completi di versante su area vasta non può prescindere dall'utilizzo di tecnologie informatiche, quali quelle legate all'impiego del GIS (Geographic Information System), in grado di gestire un numero rilevante di informazioni variamente distribuite sul territorio e che includono la geologia del sito, la vegetazione, le caratteristiche idrauliche e geotecniche dei terreni, i valori degli indicatori di evento.

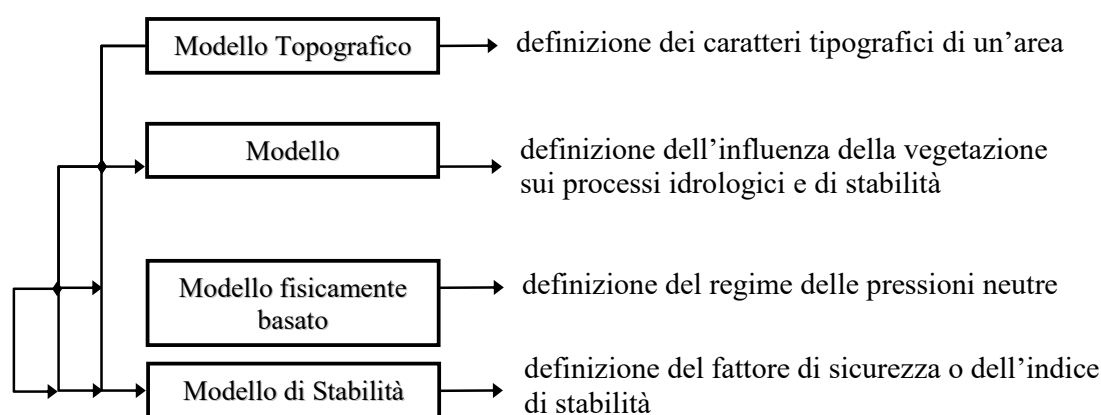


Figura 4.13 – Struttura concettuale dei modelli fisicamente basati.

4.3.2. Il Presidio Territoriale

La capacità di previsione e prevenzione degli eventi estremi basata sul monitoraggio strumentale può essere notevolmente accresciuta da una sistematica attività di presidio territoriale delle zone potenzialmente sede dei fenomeni di primo distacco, oltre che di transito e deposizione delle masse instabili. L'attività di presidio può, inoltre, consentire il controllo dell'efficienza delle opere di mitigazione del rischio già realizzate e il cui malfunzionamento potrebbe non solo non apportare alcun beneficio ma, addirittura, influire negativamente sulle condizioni di stabilità dei versanti.

Elemento peculiare dell'attività di presidio territoriale è la continuità temporale delle attività di campo finalizzate alla raccolta di tutti quegli elementi "di base" di tipo geotecnico, geologico, morfologico e idrogeologico che concorrono alla conoscenza del territorio e della sua predisposizione alla franosità. A tali fini vanno sistematicamente aggiornate, secondo ben definiti protocolli di

acquisizione dei dati, numerosi tematismi tra i quali, a puro titolo esplicativo, si citano:

- la carta geologica e strutturale;
- la carta delle coperture detritiche;
- la carta geomorfologica di dettaglio;
- la carta inventario dei fenomeni franosi;
- la carta degli indicatori di evento (quali apertura di fratture nei depositi sciolti di copertura e suzioni nel sottosuolo);
- la carta degli insediamenti;

Il presidio deve essere svolto da personale tecnico qualificato che contempli le professioni dell'ingegnere e del geologo. I prodotti dell'attività di presidio, così come i verbali delle attività di sopralluogo, ancora una volta da redigere secondo ben definiti protocolli, devono essere consegnati all'Autorità preposta alla salvaguardia della pubblica e privata incolumità e archiviati su supporto informatico.

L'attività del presidio territoriale va sviluppata sotto la guida di un gruppo di coordinamento al quale devono essere demandate la programmazione e la gestione delle attività ordinarie e di quelle da espletarsi durante situazioni di allerta e di allarme.

Particolarmente incoraggiante è, a questo riguardo, l'esperienza maturata ancora una volta nel corso della gestione scientifica dell'emergenza del 1998, quando il controllo della situazione era in carico alla U.O. 2.38 del GNDICI. Le procedure tecnico-amministrative che hanno regolato, per un lungo periodo di tempo, il Presidio Territoriale nel corso dell'emergenza del 1998 sono dettagliatamente descritte in Cascini et al. (2005). Il protocollo di azione di questa importante Struttura di controllo del territorio, che monitorava visivamente tutti i luoghi nei quali era stato cartografato un pericolo, è riportato in Figura 4.14.

**MISSIONE 4
ISTRUZIONE
RICERCA**

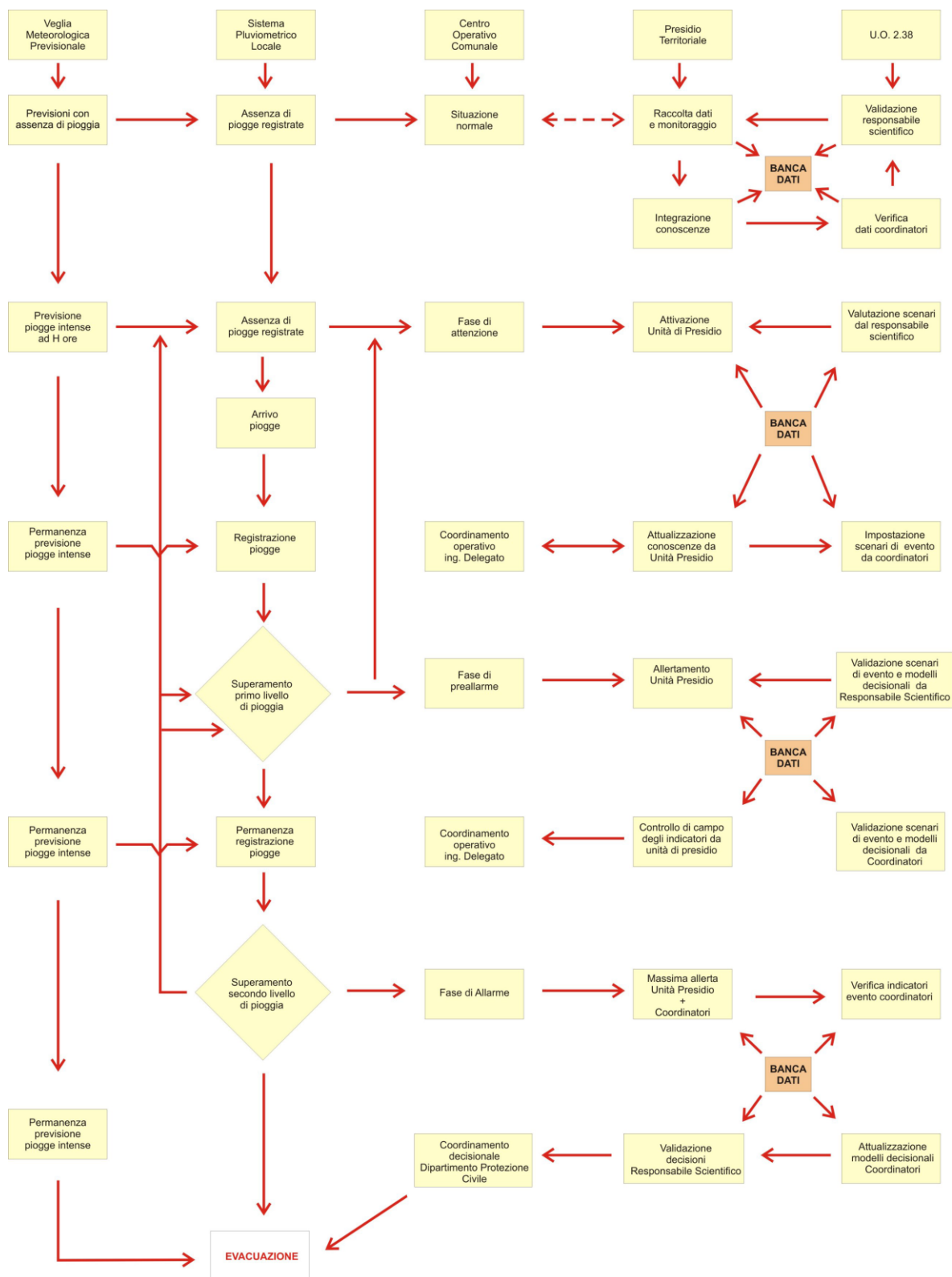


Figura 4.14 – Diagramma di flusso delle procedure adottate dal Presidio Territoriale nelle fasi ordinarie e durante le fasi di attivazione dei Centri Operativi Comunali (Cascini, 2005).

5. PIANIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI

Nel secolo scorso, le emergenze che si sono susseguite sul territorio nazionale hanno rappresentato il motore trainante sia per l'impianto legislativo e sia per i finanziamenti erogati dal Governo centrale ai fini della mitigazione del rischio da frana. D'altro canto, per come osservato da Cascini (2014), politiche di prevenzione sono state prevalentemente perseguite a livello regionale e locale attraverso la realizzazione negli anni di una miriade di interventi, di entità globalmente significativa dal punto di vista economico ancorché di gran lunga inferiore all'impegno assunto dal Governo centrale a valle delle emergenze. Anche quest'altra fonte di finanziamento, tuttavia, può anche non condurre ai risultati attesi in termini di mitigazione del rischio se vengono meno le necessarie azioni sinergiche tra gli Enti competenti in materia di difesa del suolo. Con la conseguenza di realizzare interventi singolarmente apprezzabili, oltre che tecnicamente utili, ma che, in termini di sistema, risultano di scarsa efficacia essendo scollegati tra loro.

Al fine di fornire un contributo sul tema che non ha la pretesa di essere esaustivo per la complessità ad esso intrinseca, considerato anche il grande impegno in tale direzione continuamente profuso dalle Autorità di Bacino Distrettuali, nel presente Capitolo si propongono degli approcci di tipo multiscalare che, muovendosi dalle scale più piccole a quelle più grandi, consentono il perseguimento di successivi obiettivi parziali per due macro-classi di instabilità di versante. A tal riguardo, preme ricordare che le frane che si muovono su zone di taglio che coinvolgono terreni a grana fine sono generalmente caratterizzate da valori di velocità che, nella fase parossistica del movimento, non superano 1,8 m/h (Hung et al., 2005). Per questo motivo, la loro cinematica è definita "lenta" per distinguerle dalle frane "rapide" che, al contrario, possono generalmente raggiungere valori di velocità significativamente superiori a 1,8 m/h (Hung et al., 2001; 2005). Secondo Cruden e Varnes (1996), la suddetta distinzione tra frane lente e rapide è strettamente correlata alla gravità dei danni agli elementi esposti. Concentrandosi inizialmente sulle frane lente che colpiscono le aree urbane, esse generalmente non causano danni diretti o indiretti (Roberds, 2005) alle persone esposte, come vittime (feriti e morti). Tuttavia, possono causare danni diretti alle strutture esposte (ad esempio edifici e infrastrutture) la cui funzionalità o addirittura stabilità potrebbero essere gravemente compromesse, con costi sociali ed economici (Corominas et al., 2014; Mansour et al., 2011; Peduto et al., 2018).

Per affrontare questo problema, è necessario adottare strategie volte a mitigare il rischio da frane lente che interessano le strutture (Fell et al. 2005); d'altra parte, tali strategie devono essere efficaci e, allo

stesso tempo, sostenibili per le parti interessate (Leroi et al. 2005). A questo proposito, una prospettiva è offerta dallo sviluppo di approcci metodologici multiscala – che utilizzano anche le informazioni raccolte dalle tecniche di monitoraggio satellitare – che consentono di ottimizzare i processi decisionali in *i)* pianificazione (obiettivi a medio-lungo termine), *ii)* programmazione, con una corretta allocazione delle risorse economiche disponibili (obiettivi a breve termine) e *iii)* progettazione di misure di mitigazione del rischio. Questi ultimi possono includere interventi strutturali e/o non strutturali. In particolare, gli interventi strutturali possono *i)* perseguire la riduzione dell'intensità delle frane lente (ad esempio, la velocità di spostamento) a valori compatibili con la funzionalità delle strutture esposte (riduzione del rischio) e/o *ii)* consistere in lavori di manutenzione ordinaria (verniciatura, riparazione di crepe) e straordinaria (adeguamento/rafforzamento) delle strutture esposte (conservazione e riduzione della vulnerabilità fisica). D'altra parte, gli interventi non strutturali comprendono (Ho, 2004; Fell et al., 2005): la prevenzione (ad esempio il trasferimento delle famiglie), il trasferimento (ad esempio tramite polizze assicurative) e il monitoraggio/allerta (per l'evacuazione temporanea delle persone a rischio). Infine, le strategie di comunicazione del rischio (ad esempio campagne di educazione pubblica e servizi di informazione) possono essere utilizzate per affrontare la questione della tolleranza al rischio da parte delle parti interessate coinvolte.

Seguendo questa linea di pensiero e facendo riferimento a Gullà et al. (2017a), l'approccio metodologico multiscalare proposto punta a mitigare il rischio per le aree urbane colpite da frane lente attraverso la pianificazione progressiva e integrata (a scala media, 1:25.000), la programmazione (a grande scala, 1:5.000) e la progettazione (a scala di dettaglio, 1:2.000) di interventi strutturali/non strutturali (Fig. 5.1). Data una scala di analisi, l'approccio citato comporta generalmente *i)* la caratterizzazione delle frane lente rappresentative di un contesto geologico omogeneo (Gullà et al. 2017b) e *ii)* la determinazione delle relazioni tra la causa (variazioni del valore del parametro di intensità della frana adottato) e l'effetto (gravità dei danni subiti dagli edifici e dalle infrastrutture a rischio) (Ferlisi et al., 2018; Nicodemo et al., 2017; Palmisano et al., 2018; Peduto et al., 2017, 2018). Con riferimento a queste ultime relazioni, la stima dei valori da associare al parametro d'intensità della frana può derivare dall'elaborazione dei dati raccolti con tecniche di monitoraggio convenzionali (ad esempio, inclinometri, rilievi topografici, sistemi GPS) e/o tecniche di monitoraggio innovative come quelle basate sull'uso di sensori radar ad apertura sintetica (SAR). A questo proposito, è attualmente disponibile un ricco archivio di dati SAR (cioè, immagini) che copre un lungo intervallo di tempo (più di trent'anni), con una risoluzione spaziale che va da alta (ad

esempio i sensori radar di prima generazione come ERS1-2, ENVISAT, RADARSAT1, quelli ancora in orbita come RADARSAT2 e la missione Sentinel-1 che opera in banda C) ad altissima (ad esempio le missioni COSMO-SkyMed e TerraSAR-X, entrambe operanti in banda X). Le immagini acquisite dai due set di sensori radar ed elaborate mediante tecniche interferometriche differenziali (DInSAR) (Bianchini et al., 2013; Calò et al., 2012, 2014; Calvello et al., 2017; Cascini et al., 2013; Gullà et al., 2017b; Herrera et al., 2013; Peduto et al., 2017; Tofani et al., 2014; Wasowski e Bovenga, 2014) sono, rispettivamente, adatte all'analisi su scala piccola/media (alta risoluzione) e su scala grande/di dettaglio (altissima risoluzione) a costi accessibili se confrontate con i sistemi di monitoraggio convenzionali (Peduto et al., 2015).

Per quanto riguarda la stima degli effetti sulle strutture esposte, sono necessari rilievi in situ volti a generare inventari dei danni per una categoria definita di elementi a rischio (ad esempio, edifici in muratura) a scala media e grande. La severità dei danni registrati può essere classificata secondo sistemi qualitativi, come quello basato sulla facilità di riparazione dei danni visibili (Burland et al., 1977), e può essere utilizzata per generare curve di fragilità empiriche che esprimono la probabilità di raggiungere o superare un certo livello di severità dei danni per un dato valore del parametro dell'intensità della frana (Shinozuka et al., 2000). D'altra parte, a scala di dettaglio, i livelli di severità dei danni possono essere associati a valori limite di parametri (ad esempio la deformazione a trazione sulle pareti portanti) da introdurre in criteri di danneggiabilità semi-empirici (Son e Cording 2005; Burland 1995).

Vale la pena notare che la rappresentazione spaziale degli elementi a rischio (edifici e infrastrutture) dovrebbe adattarsi alla scala dell'analisi, come sintetizzato nella Figura 5.1 ed evidenziato da van Westen et al. (2008).

La Figura 5.1 mostra anche il diagramma di flusso della metodologia multiscala proposta che, sulla base dei suggerimenti forniti da Fell et al. (2008) e seguendo in via preliminare un approccio top-down (Cascini, 2015), include tre livelli di metodi di analisi (di base, intermedio e avanzato) in base alle procedure adottate (basate sulla conoscenza, empiriche, numeriche) e ai dati di input utilizzati (disponibili o da acquisire).

In primo luogo, è necessario svolgere attività a piccola scala per informare le autorità regionali sui territori comunali le cui aree urbane sono esposte a frane lente. Tali attività comportano la combinazione di dati DInSAR ad alta risoluzione con le informazioni raccolte dall'inventario delle frane/mappe urbane in un ambiente GIS (Geographic Information System).

Con riferimento all'area urbana di un determinato comune (selezionato tra quelli più esposti a frane lente sulla base dei risultati ottenuti su piccola scala), le attività a media scala riguardano l'interpretazione fenomenologica dei meccanismi di frana basata sull'uso congiunto di dati DInSAR ad alta risoluzione e informazioni raccolte durante rapide indagini sui danni agli edifici e/o alle infrastrutture. I risultati ottenuti possono aiutare le autorità regionali e locali a pianificare categorie ben definite di misure di mitigazione del rischio (ad esempio interventi di stabilizzazione dei pendii) per le porzioni rilevate dell'area urbana citata.

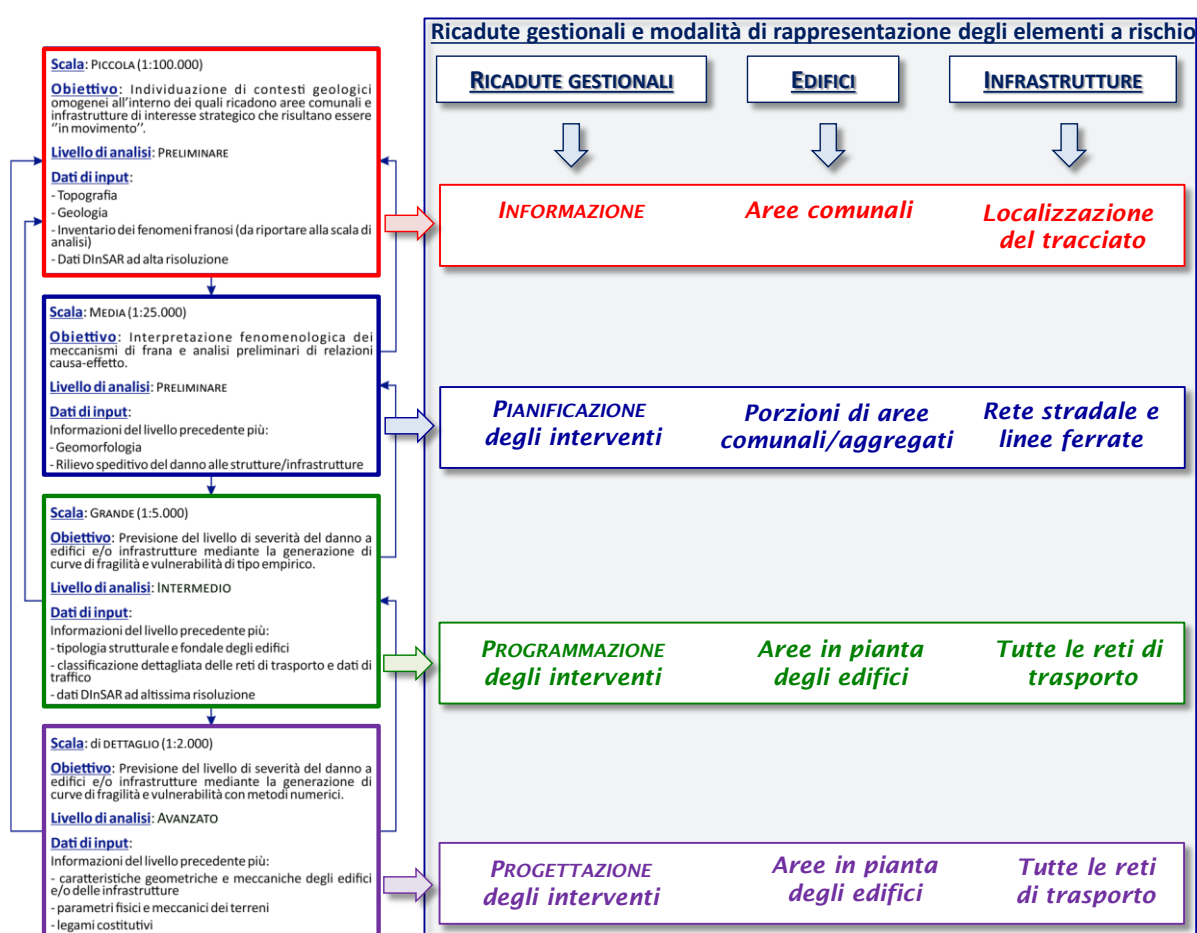


Figura 5.1 – Diagramma di flusso della metodologia multi-scalare proposta per la gestione delle attività mirate alla mitigazione del rischio da frane a cinemática lenta per edifici e infrastrutture di cui si distinguono le modalità di rappresentazione spaziale in relazione alla scala di analisi.

Le attività a grande scala mirano ad agevolare le autorità locali e i funzionari tecnici nella selezione e nella programmazione degli interventi strutturali/non strutturali più adeguati (tra le categorie pianificate su media scala). Ciò può essere fatto analizzando e prevedendo i livelli di severità dei danni – mediante curve di fragilità empiriche – relativi a edifici e infrastrutture omogenei (in termini

di tipologie strutturali e/o di fondazione) coperti da dati DInSAR ad altissima risoluzione e che interagiscono con frane a cinematica lenta tipizzate in base alle loro caratteristiche geometriche e cinematiche (Cotecchia et al., 2016; Ferlisi et al., 2018; Gullà et al., 2017b; Peduto et al., 2017, 2018). Infine, le attività a scala di dettaglio – destinate ai tecnici per progettare correttamente gli interventi più adeguati programmati a grande scala – consistono in simulazioni numeriche (ad esempio analisi sforzo-deformazione), basate su un modello geotecnico del pendio, per prevedere sia il valore massimo dell'intensità della frana a cinematica lenta considerata, sia la severità dei danni che potrebbero subire gli edifici/le infrastrutture interagenti, le cui caratteristiche strutturali sono selezionate in base ai risultati ottenuti a grande scala.

Come mostrato nella Figura 5.1, l'approccio metodologico proposto è iterativo e dovrebbe essere aggiornato periodicamente man mano che diventano disponibili le informazioni raccolte dal monitoraggio e dalle indagini in situ. D'altra parte, i risultati ottenuti alle scale più grandi possono essere utilizzati per migliorare procedure specifiche da applicare alle scale più piccole (Gullà et al., 2017a). Ciò consente l'adozione di ipotesi di lavoro preliminari che possono essere successivamente modificate/integrate in base ai risultati progressivamente raggiunti e facilita una rapida attuazione del processo decisionale, garantendone anche l'efficacia in base alle scale di analisi e agli scopi correlati. Per ciò che concerne le frane a cinematica rapida, quali si configurano le colate e le valanghe di detrito (Hung et al., 2014), esempi di interventi strutturali sono rintracciabili nei quattro Comuni ai piedi del versante del Pizzo d'Alvano (Bracigliano, Quindici, Sarno e Siano) nella Regione Campania colpiti dagli eventi di frana del maggio 1998, in risposta alla grande eco mediatica che gli stessi ebbero per il verificarsi di 159 vittime (si ricorda, al riguardo, che la società è maggiormente disposta a tollerare un numero anche significativo di eventi che causano poche vittime piuttosto che un unico evento che causa molte vittime). In particolare, sono stati realizzati interventi essenzialmente di protezione – o di tipo “passivo” (v. Cap. 4) – il cui notevole costo (confrontabile con la perdita economica registrata a seguito degli eventi) è principalmente da attribuire a un sovradimensionamento degli stessi, anche condizionato dalle modeste conoscenze sul tema della mitigazione del rischio da frana all'epoca disponibili.

Questo “modello” di interventi (noto anche come “modello Sarno”) è oggi esportabile? La risposta è immediata se si considera che, nella sola Campania, sono 212 i Comuni nei quali – immediatamente a valle dell'evento del maggio 1998 – è stato riconosciuto (su base qualitativa) un rischio da frana molto elevato (Cascini, 2014). Inoltre, che la cifra da impegnare sia spropositata lo si comprende osservando che gli elementi conoscitivi oggi disponibili consentono di stabilire una graduatoria di

priorità di intervento tra i citati Comuni. A tal riguardo, grazie alla disponibilità di un catalogo di dati storici che si estende dal 1640 al 2006, è stato possibile evidenziare come gli eventi che nel passato hanno causato vittime si concentrino in una porzione ($\approx 1400 \text{ km}^2$) della Regione nella quale coltri di materiale piroclastico derivanti dall'attività esplosiva del complesso vulcanico Somma-Vesuvio poggiano su substrato carbonatico (denominato contesto geologico A1) e che comprende 121 Comuni (Cascini et al., 2008). Operando, infine, una distinzione dei fenomeni che possono interessare le coltri piroclastiche tra flussi iperconcentrati e colate/valanghe di detrito (che differiscono in maniera sostanziale per modalità di innesco, materiali coinvolti, velocità raggiunte, volumi mobilizzati, reologia e, quindi, conseguenze attese), Ferlisi e De Chiara (2016) hanno messo in luce (Fig. 5.2) come i flussi iperconcentrati si manifestino prevalentemente in aree di versante limitrofe alla costa della Regione Campania e coinvolgono 25 Comuni dei 121 in precedenza citati. Ciò è dovuto, essenzialmente, alla presenza di barriere orografiche (Monti Lattari e Monti di Sarno) a cui si associano effetti di amplificazione locale delle precipitazioni che risultano più intense sul versante sopravvento e che si riducono drasticamente su quello sottovento.

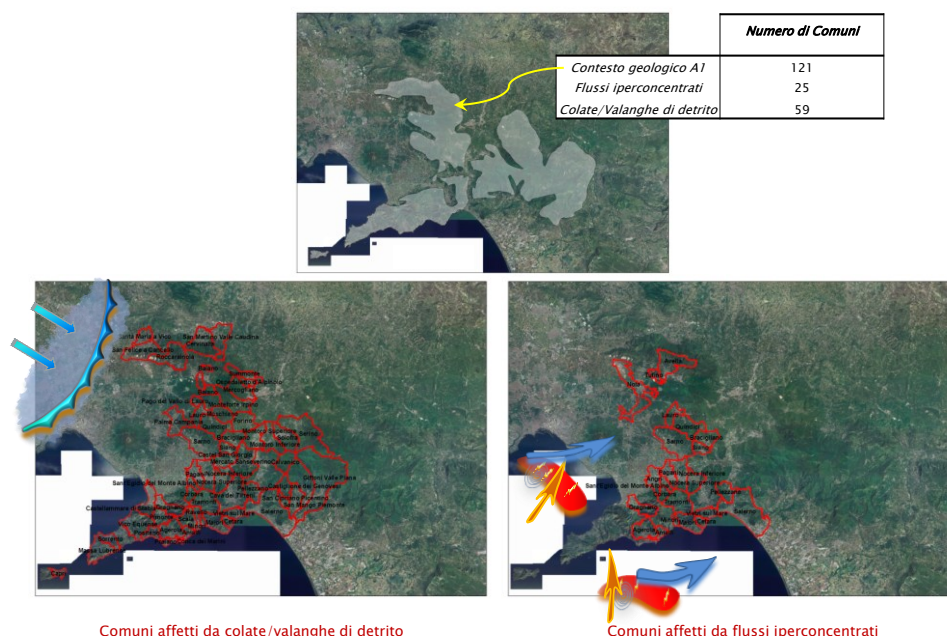


Figura 5.2 – Distribuzione spaziale dei territori comunali sistematicamente interessati da colate/valanghe di detrito e flussi iperconcentrati nel contesto geologico A1 della Regione Campania (modificato da Ferlisi e De Chiara, 2016).

Le colate/valanghe di detrito coinvolgono, invece, 59 Comuni dei 121 in precedenza citati. Tale circostanza è da mettere in relazione con la tipologia dei processi meteorologici (eventi frontali) responsabili del loro accadimento; d'altra parte, non va sottovalutato l'importante ruolo giocato da fattori antropici (per esempio, la presenza di sentieri e i tagli antropici) ed idrogeologici (per esempio, le sorgenti) nell'innescare di frane di primo distacco.

In definitiva, gli studi a carattere regionale consentono di individuare i Comuni che prioritariamente necessitano di studi sul rischio da frana da condurre a scale di maggior dettaglio e per i quali può essere richiesta la messa in opera di interventi strutturali di mitigazione, ottimizzando l'uso delle risorse economiche disponibili.

Muovendosi, poi a scala comunale un ulteriore aspetto da non sottovalutare è quello che riguarda il dialogo tra cittadini, imprese, istituzioni e ricercatori per giungere a soluzioni tecniche per la mitigazione del rischio da frana che siano sostenibili, ovvero ritenute più appropriate da un punto di vista ambientale, economico e sociale. Un esempio al riguardo è fornito dal territorio di Nocera Inferiore (SA) che nel 2005 è stato sede di una valanga di detrito che ha causato la perdita di tre vite umane e che nel 2010 è stato scelto come unico caso studio di un progetto di ricerca europeo per progettare e testare un processo deliberativo, di tipo partecipato (Linnerooth-Bayer et al., 2016). In tale ambito si sono inizialmente sviluppati tre differenti scenari di intervento, a loro volta ispirati alle tre diverse visioni sulla gestione del rischio da frana emerse anche a seguito degli esiti di interviste e di un questionario pubblico, ciascuno entro un determinato limite di budget (quello reso disponibile alle Autorità regionali sulla base di un finanziamento concesso da parte del Governo centrale). Queste opzioni sono state successivamente discusse nell'ambito del processo partecipato consentendo il raggiungimento di una "soluzione di compromesso" che è risultata condivisa da un'ampia maggioranza e che ha risposto appieno ai requisiti che ogni intervento sostenibile dovrebbe soddisfare.

6. APPROCCI ALLA PROGETTAZIONE DEL SINGOLO INTERVENTO STRUTTURALE

La progettazione di un intervento strutturale di mitigazione del rischio da frana richiede l'individuazione da parte del progettista – sulla base dei dati descrittivi e quantitativi disponibili e tenendo conto di vincoli operativi ed economico/finanziari – del tipo di approccio che intende adottare nell'analisi tra quello volto alla stima del fattore di sicurezza (*Factor of Safety Approach* – FSA), quello che ricorre all'evento di progetto (*Design Event Approach* – DEA) o ancora quello che conduce a stime quantitative del rischio (*Quantitative Risk Assessment* – QRA). All'approccio scelto corrispondono analisi tese a valutare le condizioni *pre-intervento* del versante che è sede attuale o potenziale di processi di instabilità nonché delle categorie di elementi esposti al rischio che si intende attenzionare e a definire l'obiettivo da perseguire in termini di miglioramento della predetta condizione a seguito della realizzazione dell'intervento (*post-intervento*) mediante la specifica selezione di una o più variabili di controllo di cui è noto sia il valore nella condizione pre-intervento sia quello da perseguire (target) sulla base di ben definiti criteri di accettabilità o tollerabilità.

Nello caso in cui il progettista opti per l'impiego dell'FSA, l'approccio da seguire prevede il calcolo del fattore di sicurezza definito dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento (in atto o potenziale) e quella mobilitata lungo di essa. In accordo con l'aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2018) e le Linee Guida AGI-ISPRA (2022), tale approccio si applica principalmente agli interventi strutturali di prevenzione facendo riferimento al tradizionale fattore di sicurezza dove la superficie di scorrimento presa in considerazione dovrà avere geometria coerente con il modello geologico ed essere individuata nel modello geotecnico sulla base della tipologia del movimento franoso e del meccanismo che ne contraddistingue la fase di attivazione/riattivazione (nel caso di processi instabili in atto) o di innesco (nel caso di eventi potenziali). L'efficacia dell'intervento dovrà essere valutata in base all'incremento del fattore di sicurezza minimo rispetto a quello precedentemente stimato in assenza di intervento.

Se si opta per l'impiego del DEA, da privilegiare per opere di protezione dove la finalità dell'intervento può essere quella di contenere i valori di progetto della magnitudo (in termini di volumi mobilitati/mobilitabili) e/o dell'intensità (ad esempio, in termini di velocità di spostamento del corpo di frana) entro un determinato valore limite, l'approccio che il progettista dovrà seguire si basa su una valutazione semi-quantitativa della suscettibilità all'innesco del movimento franoso e

delle relative conseguenze attese (Ng et al., 2002). In tale condizione le incertezze che intervengono nel problema sono introdotte in forma globale ed implicita (Ho, 2004).

Nel caso di analisi quantitative del rischio (QRA), l'obiettivo da perseguire è la riduzione di una o più variabili del rischio tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità. Come già precisato nel Capitolo 2, il QRA si sostanzia di studi rigorosi volti alla generazione di scenari delle conseguenze che fanno riferimento a diversi valori della probabilità di accadimento di frane di assegnata intensità, le cui fasi di movimento (Leroueil et al., 1996) devono essere modellate con l'ausilio di metodi avanzati propri dell'Ingegneria Geotecnica. In tale ambito, le incertezze possono essere contemplate in modo sistematico ed esplicito (Ho, 2004).

Indipendentemente dall'approccio che si intende adottare, il progettista deve chiaramente individuare e specificare, per ciascuna delle variabili di controllo scelte, a quale particolare area, meccanismo o punto monitorato fa riferimento oltre che alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo necessario per lo sviluppo delle analisi (attesa la disponibilità di dati geologici e geotecnici accurati, oltre che di modelli digitali del terreno di buona/elevata qualità). Infatti, unitamente alla caratterizzazione del processo franoso, è necessario definire il modello geotecnico di sottosuolo che dovrà tradursi in sezioni stratigrafiche di progetto – con riferimento all'intervento, scelto sulla base della tipologia di frana e tenuto conto delle cause che sono all'origine della sua attivazione/riattivazione (Capobianco et al., 2022), e al più ampio contesto nel quale l'intervento stesso si inserisce – da redigere in una scala idonea ad individuare la delimitazione del corpo di frana e la posizione dell'intervento rispetto ai contatti stratigrafici o a elementi strutturali di particolare importanza. Coerentemente poi con il tipo di approccio prescelto e gli obiettivi dell'intervento, il progettista è chiamato innanzitutto a individuare il metodo (ad esempio, all'equilibrio limite o di analisi numerica agli spostamenti) da impegnare nell'analisi del pendio e per il dimensionamento dell'intervento (che può anche differire da quello impiegato per le analisi *pre-intervento*), nonché a definire le azioni che intervengono sul pendio e sull'intervento da considerare nell'esecuzione di analisi sia in campo statico che dinamico (si veda, al riguardo, quanto riportato nel Cap. 3 delle NTC, 2018). In particolare, il progettista può in generale ricorrere in campo statico ad approcci semplificati basati su abachi o carte di stabilità, oppure fare riferimento ai classici metodi dell'equilibrio limite per la valutazione del fattore di sicurezza mediante approccio FSA; nel caso di analisi di tipo DEA o QRA, dovrà in generale ricorrere all'utilizzo di codici numerici agli spostamenti. Per le analisi in condizioni sismiche, in funzione della metodologia di calcolo scelta dal progettista e delle azioni di progetto individuate si può ricorrere all'impiego di uno dei metodi generalmente impiegati per le

analisi in campo dinamico (ad esempio, metodi pseudo-statici, metodi pseudo-dinamici, analisi dinamiche complete) avendo cura di delineare e descrivere le caratteristiche della metodologia di calcolo prescelta. Per maggiori approfondimenti sulla scelta e le caratteristiche dei metodi di calcolo per analisi in campo statico e dinamico si rimanda alle più volte richiamate Linee Guida AGI-ISPRA (2022). Ovviamente, gli aspetti connessi alla durabilità (Cap. 2 delle NTC, 2018), così come i dettagli di cantierizzazione, l'indicazione delle tempistiche e la valutazione dei costi, saranno parti integrante del progetto.

L'efficacia dell'intervento o degli interventi di mitigazione del rischio opportunamente dimensionati deve essere poi valutata sempre nel rispetto della normativa vigente che può richiedere o meno la stima del rischio residuo conseguente alla realizzazione delle opere. I principali aspetti legati alla verifica dell'efficacia degli interventi strutturali e alle analisi costi-benefici sono trattati nel successivo Cap. 7.

7. VERIFICA DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI E ANALISI COSTI-BENEFICI

Tra le fasi più importanti della progettazione degli interventi di mitigazione del rischio da frana vi è quella riguardante la valutazione della loro efficacia, ovvero della loro reale capacità di salvaguardare persone e cose rispetto al verificarsi di frane di assegnata magnitudo e/o intensità. Tale efficacia dovrà poi essere garantita durante tutta la vita nominale di progetto degli stessi interventi (efficienza) mediante adeguate attività di manutenzione. È ovvio che più le opere sono grandi, maggiori sono i costi di manutenzione. Da qui la necessità di procedere a un corretto dimensionamento (v. Cap. 6) che può giovare di dati conoscitivi, quali sono quelli acquisibili con indagini e prove geotecniche in sito. Ad esempio, la possibilità di poter ricostruire la distribuzione spaziale degli spessori di coltri che sono sede potenziale di frane di primo distacco pluvio-indotte abilita a una stima adeguata dei volumi mobilitabili, con ovvie conseguenze sul dimensionamento di opere di protezione (quali si configurano le vasche di espansione).

La distinzione posta nel Cap. 6 tra i tre approcci alla progettazione (FSA, DEA e QRA) discrimina le modalità di valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione del rischio che deve avvenire nel rispetto della normativa vigente. Quest'ultima può richiedere o meno la stima del rischio residuo conseguente alla realizzazione delle opere; a tal riguardo, il rischio residuo va inteso come il rischio da frana valutato al termine di una fase di analisi del rischio che contempla la presenza di interventi di mitigazione (AGI-ISPRA, 2022).

In assenza di una normativa che richieda espressamente la stima del rischio residuo, per la progettazione degli interventi (qualora di tipo strutturale) si può fare riferimento alle sole prescrizioni contenute nelle NTC (2018). In particolare, i progettisti devono rifarsi a quanto riportato nel § 6.3.5 delle NTC (2018) – sintetizzante le norme che si applicano allo “*studio delle condizioni di stabilità dei pendii naturali e al progetto, alla esecuzione e al controllo degli interventi di stabilizzazione*” – e nel corrispondente paragrafo C6.3.5 della Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Quest'ultima chiarisce che nel “*dimensionamento degli interventi di stabilizzazione devono essere valutate le condizioni di stabilità iniziali, prima dell'esecuzione dell'intervento, e quelle finali, ad intervento eseguito, in modo da valutare l'incremento del margine di sicurezza rispetto al cinematismo di collasso critico potenziale o effettivo*”. Il livello di sicurezza che l'intervento sarà in grado di garantire rispetto al verificarsi di fenomeni di instabilità dovrà essere ritenuto accettabile dal progettista in base “*al livello di affidabilità dei dati acquisiti, alla validità del*

modello di calcolo utilizzato, nonché al livello di protezione che si vuole garantire e che è funzione delle conseguenze di un eventuale fenomeno franoso”.

È utile osservare come le NTC (2018) diano indicazioni chiare su una ben precisa categoria di interventi strutturali di mitigazione del rischio, ovvero quelli definiti di prevenzione in Figura 4.1, puntando l’attenzione sulla verifica della sussistenza di margini di sicurezza accettabili nei riguardi di uno Stato Limite Ultimo (di scorrimento). Quest’ultima può essere eseguita mediante metodi di calcolo che prescindono dalla stima degli spostamenti che precedono il raggiungimento del collasso, come quelli rientranti nella famiglia dei metodi dell’Equilibrio Limite Globale (Airò Farulla, 2001). D’altra parte, l’asserto al paragrafo C6.3.5 della Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici implicitamente richiama concetti che sono propri della teoria del rischio (incertezze nei dati di input, modelli di calcolo i cui risultati devono essere validati, previsione delle conseguenze attese) e alla cui logica il progettista deve adeguarsi. Ad ogni modo, la circostanza per la quale la sicurezza debba essere valutata portando in conto anche le possibili conseguenze sugli elementi esposti al rischio (a loro volta classificabili sulla base di una scala di priorità), induce a ritenere che (Jappelli, 1999): *“[...] in molti casi è ancora consigliabile concentrare in un unico numero la misura della sicurezza complessiva disponibile, ricorrendo a un coefficiente di sicurezza globale. A differenza dei coefficienti di sicurezza parziali, il coefficiente di sicurezza globale viene introdotto in un singolo passo del processo di calcolo per concentrare in un unico numero la considerazione delle imperfezioni e delle incertezze, che in realtà sono distribuite sui vari parametri che definiscono la situazione geotecnica, alla quale si fa riferimento nel modello. Per una semplice analogia si può fare riferimento, ad esempio, al criterio con il quale per la valutazione di un’opera cinematografica si assegnano differenti punti all’attore protagonista, allo scenografo, al fotografo, al regista, e così via, ma non si rinuncia ad esprimere anche un giudizio d’insieme con le stellette che derivano da una misteriosa combinazione dei punti precedenti”.*

È appena il caso di osservare che, a rigore, le suesposte verifiche di sicurezza andrebbero svolte considerando diversi scenari di intervento in modo da valutarne il relativo beneficio. Qualora questo dovesse risultare inadeguato al particolare problema che si sta considerando, non è da escludere la possibilità di ricorrere a interventi non strutturali basati su sistemi di monitoraggio agganciati a piani di gestione delle emergenze (Musso, 1997).

Nel caso in cui l’approccio progettuale scelto per il dimensionamento degli interventi strutturali di mitigazione del rischio sia il DEA, l’attenzione del progettista deve concentrarsi – ai fini della valutazione dell’efficacia degli stessi – verso la riduzione dei valori assunti da una o più variabili di

controllo, usualmente di tipo energetico per le frane rapide (ad esempio, colate/valanghe di detrito o crolli in roccia) o cinematico per le frane lente (ad esempio, scorrimenti o colate di terra). Su quest'ultimo aspetto, nel già richiamato paragrafo C6.3.5 della Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, viene specificato che nel *“caso di frane di ampie dimensioni, per le quali non sempre è possibile giungere alla stabilizzazione, gli interventi possono essere progettati con il fine di rallentare l'evoluzione dei fenomeni in atto”*. Questa affermazione introduce un'importante novità nella progettazione degli interventi di mitigazione del rischio che potrà basarsi sul soddisfacimento di verifiche allo Stato Limite di Esercizio; ad esempio, garantendo che – immediatamente a valle della realizzazione del generico intervento – la velocità media annuale di un corpo di frana esistente si attesti su valori compatibili con la funzionalità di infrastrutture interferenti (Galli e di Prisco, 2013).

Laddove sia vigente la normativa di settore, ovvero le Norme di Attuazione associate ai PsAI-Rf (L. 365/2000), si deve valutare il rischio residuo su basi qualitative (AGI-ISPRA, 2022). A tal riguardo, l'efficacia degli interventi di mitigazione del rischio può essere dimostrata *“in termini di riduzione della pericolosità”* (Par. C6.3.5 della Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici) se il progettista verifica che la variabile di controllo prescelta risulta inferiore a un limite stabilito nel corso della vita nominale di progetto degli interventi (DEA). Ma, di fatto, lo stesso asserto normativo può ritenersi applicabile al caso in cui si privilegi l'adozione del FSA considerato che l'incremento stimato del fattore di sicurezza si associa implicitamente a una riduzione della probabilità d'innescio di frane di primo distacco ovvero di attivazione/riattivazione di frane esistenti. Resta il fatto che, in presenza di una norma di settore, la realizzazione di opere non esplicitamente consentite in aree R3 ed R4 è subordinata all'approvazione – oggi da parte dell'Autorità di Bacino Distrettuale competente (D.lgs. n. 152 del 3 aprile 2006) – di una richiesta di ripermimetrazione nella quale si dimostri che il reale livello di rischio R nell'area soddisfa la disequazione:

$$R < R3, R4 \quad (7.1)$$

in assenza o in presenza di interventi di mitigazione del rischio (questi ultimi da progettare a una scala di dettaglio, anche ben maggiore di quella adottata per la redazione della cartografia ufficiale di zonazione del rischio).

È appena il caso di osservare che l'introduzione – per la prima volta – del concetto di pericolosità da frana nella normativa tecnica rappresenta una svolta epocale nell'affronto del problema in quanto apre la strada verso l'adozione del QRA in campo progettuale. Ciò consentirebbe ai progettisti di poter dimostrare oggettivamente la bontà del proprio operato, atteso che si pervenga a una auspicata

armonizzazione tra normativa tecnica e normativa di settore introducendo criteri condivisi di accettabilità e di tollerabilità del rischio da frana su base quantitativa (Ferlisi et al., 2014).

A tal riguardo e a titolo esemplificativo, nella Tabella 7.1 si riportano i valori del rischio tollerabile stabiliti dall’Australian Geomechanics Society (AGS, 2007) per la probabilità annuale di perdita della vita da parte dell’individuo maggiormente esposto.

Tabella 7.1 - Rischio tollerabile per l’individuo maggiormente esposto (modificata da AGS, 2007).

Contesto	Rischio tollerabile
Pendii naturali	10^{-4} /anno
Pendii artificiali o stabilizzati / Frane esistenti	10^{-5} /anno

Con riferimento, invece, al rischio da frana per la società (basato sul presupposto che la collettività sia maggiormente disposta a tollerare eventi frequenti che causano poche vittime piuttosto che eventi rari, ma con un elevato numero di vittime), può farsi riferimento alle accennate curve F-N (Leroi et al. 2005).

Sempre a titolo esemplificativo, nella Figura 7.1 si riporta il criterio proposto dal Geotechnical Engineering Office di Hong Kong (GEO, 1998).

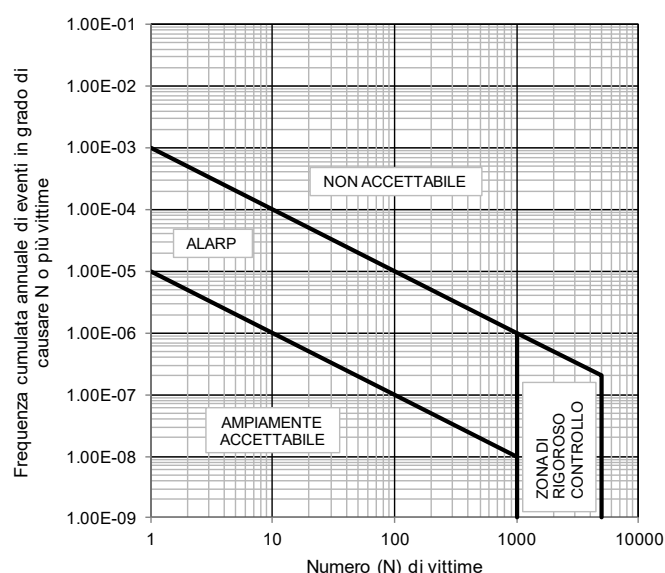


Figura 7.1. Criteri di tollerabilità del rischio per la società proposti dal Geotechnical Engineering Office di Hong Kong (modificato da GEO, 1998).

Tale criterio risulta applicabile alla zona che include un pendio (naturale) per una larghezza pari a 500 m nonché l'area pedemontana che si estende fino a una distanza massima di 150 m dal piede dello stesso pendio. L'applicazione a situazioni differenti richiede di "scalare" opportunamente il criterio verso l'alto o verso il basso. In base a questo criterio, i valori limite del rischio accettabile e del rischio tollerabile sono rispettivamente rappresentati da due tratti di retta ad andamento decrescente che isolano una regione identificata con il termine ALARP (acronimo di "As Low As Reasonably Practicable"). Tale regione include livelli di rischio non trascurabili che necessitano di essere tenuti sotto controllo o di essere ridotti, qualora ciò si rendesse necessario oltre che possibile, mediante lo svolgimento di analisi costi-benefici (GEO, 1998). Su quest'ultimo punto, è stato recentemente proposto un interessante contributo da parte di Strouth e McDougall (2021) a cui si rimanda.

8. RICADUTE SULL'IMPIEGO DI RaStEM

I concetti alla base della redazione delle presenti Linee Guida hanno ispirato la concezione e lo sviluppo di quattro tools a supporto di RaStEM il cui utilizzo *“può semplificare la presentazione delle istanze di finanziamento sul ReNDiS e contribuire a migliorare la qualità delle progettazioni, promuovendo già dalle prime fasi di progetto una maggiore attenzione e consapevolezza sulle relazioni reciproche tra dissesti, opere ed elementi esposti”* (ISPRA, 2023).

In particolare, i predetti tools offrono un contributo all'approfondimento delle conoscenze dei progettisti circa:

1. la corretta classificazione della frana oggetto di intervento e l'attribuzione della relativa classe di pericolosità sulla base di definizioni condivise per una valutazione consapevole in accordo con i concetti propri della teoria del rischio;
2. la corretta valutazione dell'efficacia di un intervento o di un insieme di interventi per la mitigazione del rischio da frana, tenendo conto della specifica funzione ad esso/essi associata, sulla base del concetto di stima del rischio residuo su base quantitativa e della sua accettabilità, anche se non completamente formalizzati.
3. una stima affidabile del numero di persone a rischio diretto, indiretto o di perdita di abitazione in condizioni ante o post operam differenziando adeguatamente le strutture/beni esposti in base alle loro caratteristiche, valorizzando anche il concetto di esposizione che si riferisce principalmente alla probabilità spazio-temporale delle persone (mediamente) esposte a rischio da frana;
4. la valutazione della vulnerabilità degli elementi fisici a rischio (edifici/strade) che interagiscono con frane a cinematica lenta utilizzando nuovi approcci di tipo probabilistico da utilizzare nelle attività volte a selezionare gli interventi di mitigazione del rischio più idonei e appropriati.

I tools consentono:

1. di considerare adeguatamente (quando utilizzati congiuntamente con gli elaborati progettuali presentati per la richiesta di finanziamento ai sensi del D.P.C.M. del 27 settembre 2021) alcune caratteristiche dei fenomeni franosi e, quindi, un utilizzo consapevole del “Manuale e Linee Guida n. 202” su “RaStEM: uno strumento di supporto per la progettazione degli interventi di difesa del suolo” (ISPRA, 2023);

2. di rispondere alle esigenze emerse del tavolo tematico E nel documento “WP4 - Monitoraggio e gestione dei rischi - Mappatura dei requisiti degli utenti target” relativamente alle principali questioni delle attività dell’Action 4.1 comprendenti:
 - I) la “stima dei parametri” (che possono riguardare la velocità ante operam e le classi di pericolosità di un'area interessata da frana);
 - II) l’importanza delle Linee Guida che rientra tra i principali bisogni e requisiti degli stessi destinatari, adeguatamente affrontati dagli strumenti informatici proposti nel facilitarne l’applicabilità.

Qui si seguito si sintetizzano i principali elementi caratterizzanti i quattro tools, rimandando ai video tutorial presenti sull’Infrastruttura di Ricerca del progetto GeoSciences IR per una loro corretta applicazione.

Tool 1 volto alla determinazione della velocità e della pericolosità ante operam associata a un’area di dissesto definita dal progettista.

Il prodotto finale è un tool di calcolo automatico e interattivo a cui un progettista può fare riferimento per la stima ante operam delle classi di velocità (v) e di pericolo (H) ante operam da associare a un'area interessata da frane (ad esempio pre-identificata/disegnata in RaStEM o in ambiente GIS su desktop locale) una volta stabiliti gli attributi che caratterizzano la stessa frana (cioè, codice di identificazione, tipologia, sotto-tipologia).

Questo tool soddisfa un requisito nel contesto dell’uso di RaStEM in cui uno dei passaggi più importanti è la definizione, da parte di un determinato progettista, delle classi di velocità e di pericolosità da associare all’area interessata dalla frana. Entrambe le classi devono essere stabilite su base precauzionale, ovvero in termini di velocità o pericolosità massima prevista.

Per quanto riguarda la velocità, RaStEM considera tre classi, ovvero:

- Classe 0, associata al simbolo ND (nessuna frana o frana non definita);
- Classe 1, associata al simbolo v1 (frana a cinematica lenta con $v \leq 2$ m/ora);
- Classe 2, associata al simbolo v2 (frana a cinematica rapida con $v > 2$ m/ora).

D’altra parte, per quanto riguarda la pericolosità, RaStEM considera cinque classi, ovvero:

- Classe 0, associata al simbolo ND (frana assente o indefinita o Area di Attenzione – AA);
- Classe 1, associata al simbolo P1 (rischio moderato);
- Classe 2, associata al simbolo P2 (rischio medio);

- Classe 3, associata al simbolo P3 (rischio elevato);
- Classe 4, associata al simbolo P4 (rischio molto elevato).

Sia per la velocità e sia per la pericolosità si raccomanda di indicare la classe riportata nella pianificazione di Bacino in vigore (Piano di Assetto Idrogeologico, Piano Straordinario o altro eventuale piano disponibile) o, se non disponibile, quella derivante dall'eventuale utilizzo di modelli matematici, archivi storici di eventi, conoscenza del territorio, ecc., specificando nel campo delle note la fonte utilizzata e i relativi riferimenti nei disegni di progetto.

In tale ambito, il tool fornisce supporto al progettista suggerendo classi di velocità e di pericolosità adeguate, valorizzando le conoscenze disponibili sui sistemi di classificazione delle frane e sulle definizioni delle classi di rischio.

Da un punto di vista operativo, il tool richiede come input il file .DBF associato allo shapefile dell'area interessata dalla frana in esame, comprese le informazioni relative al codice di identificazione e alla tipologia. Successivamente, il progettista può selezionare gli attributi della frana in esame sulla base di un'interfaccia a tendina. Nello specifico, al progettista viene richiesto di indicare un sottotipo di frana, il che significa che il progettista deve avere familiarità con i principali sistemi di classificazione delle frane forniti dalla letteratura scientifica in materia, come quello fornito da Hungr et al. (2014). Quindi, le classi suggerite sia di velocità ante operam (massima prevista) e sia di pericolosità da associare all'area colpita dalla frana in RaStEM saranno fornite automaticamente come risultati. A questo proposito, vale la pena osservare che la classe di pericolosità dovrebbe essere adeguatamente differenziata in base alle conseguenze previste del verificarsi della frana (Corominas et al., 2023). Di conseguenza, si possono prendere in considerazione le seguenti definizioni delle cinque classi di pericolo sopra indicate:

- Pericolosità indefinita o assente o Area di Attenzione AA. Pericolosità assente o trascurabile, sulla base delle informazioni attualmente disponibili.
- Pericolosità moderata (P1). Processi di deformazione profonda con cui è possibile convivere.
- Pericolosità media (P2). Processi di espansione laterale e deformazione superficiale la cui intensità non influisce sulle persone ma interferisce con strutture/infrastrutture che richiedono manutenzione periodica e possibili interventi di consolidamento.
- Pericolosità elevata (P3). Sprofondamenti (localizzati o diffusi) e frane potenziali o esistenti (a cinematica lenta) la cui intensità è tale da far temere conseguenze per la sicurezza delle persone, oltre alla perdita di funzionalità delle strutture/infrastrutture interferenti, all'interruzione temporanea delle attività economiche e a danni limitati al patrimonio ambientale.

- Pericolosità molto elevata (P4). Frane potenziali a cinematica rapida la cui intensità può causare la perdita di vite umane, la distruzione delle strutture/infrastrutture colpite, l'interruzione prolungata delle attività economiche e danni significativi al patrimonio ambientale.

Infine, le classi suggerite sia per la velocità ante operam (massima prevista) che per la pericolosità associata all'area interessata dalla frana, una volta accettate dal progettista, possono essere salvate ed esportate come nuovo file .DBF contenente i nuovi attributi. Quest'ultimo può essere associato allo shapefile che identifica l'area interessata dalla frana e quindi caricato automaticamente in RaStEM.

Tool 2 volto alla determinazione post operam della eventuale riduzione dell'estensione dell'area in dissesto, della classe di pericolosità e/o di velocità della frana, del numero di elementi esposti.

Il prodotto finale è un tool di calcolo automatico e interattivo a cui un progettista può fare riferimento per la stima post operam della possibile riduzione dell'estensione dell'area interessata dalla frana, della classe di velocità o di pericolo e del numero di elementi a rischio, una volta stabiliti gli attributi che caratterizzano l'intervento di mitigazione del rischio frana (ad esempio, codice di identificazione, gruppo, tipologia).

Questo tool offre un contributo di conoscenza al progettista in merito alla corretta valutazione dell'efficacia di un intervento o di un insieme di interventi di mitigazione del rischio frana, tenendo conto della funzione specifica ad esso/ad essi associata. Ciò implica la stima del livello di rischio in presenza dell'intervento stesso (rischio residuo), verificando che soddisfatti i requisiti di accettabilità. In assenza di criteri di accettabilità del rischio su base quantitativa, il D.P.C.M. del 27 settembre 2021 promuove la stima dell'entità della riduzione - derivante dalla realizzazione dell'intervento - di uno o più dei fattori che contribuiscono alla generazione del rischio di frana. Ciò si traduce nel dimostrare che la pericolosità da frana si riduce quando si passa dalla condizione ante operam a quella post operam (vedi anche Circolare n. 7 del C.S.LL.PP. del 21 gennaio 2019) e/o che le conseguenze sono ridotte, ad esempio in termini di numero di persone a rischio.

A questo proposito, vale la pena ricordare che in RaStEM gli interventi di mitigazione del rischio frana sono classificati in 11 gruppi (1. Interventi sui pendii, 2. Controllo dell'erosione superficiale e regimentazione delle acque, 3. Stabilizzazione superficiale, 4. Opere di rinforzo e miglioramento dei materiali, 6. Drenaggio, 7. Protezione dalla caduta massi, 8. Protezione dalle frane rapide (colate detritiche), 9. Studi e indagini, 10. Interventi non strutturali, 11. Opere complementari) rappresentative di funzioni specifiche. Ai fini del perseguimento degli obiettivi del tool proposto, i primi 9 gruppi sono implicitamente suddivisi in due macro-gruppi, rispettivamente associati agli

interventi di prevenzione (volti a ridurre la probabilità che si verifichi una frana) e agli interventi di protezione (volti a condizionare il percorso che, in loro assenza, una frana seguirebbe durante la fase di propagazione). Di solito, tali interventi non riducono necessariamente l'area interessata dalla frana, mentre potrebbero ridurre la probabilità di accadimento senza ridurre la velocità della frana (a meno che non siano stati progettati per limitare la velocità di spostamento a valori compatibili con la funzionalità delle strutture/infrastrutture interferenti, secondo una progettazione basata sulle prestazioni). D'altra parte, gli interventi non strutturali riducono solo il numero di persone a rischio. Alcune opere complementari (come le misure correttive post-evento) non riducono solo il numero di persone a rischio.

È importante notare che il tool proposto fornisce un risultato riferito a un tipo specifico di intervento di mitigazione del rischio di frana. Se la strategia adottata comprende una serie di interventi, il progettista dovrà inserire in RaStEM le informazioni derivate dalla combinazione dei risultati associati ai singoli interventi che compongono la serie.

Da un punto di vista operativo, il tool richiede come input il file .DBF associato allo shapefile dell'area interessata dalla frana in esame, compresi gli attributi (cioè, codice di identificazione, gruppo, tipologia) che caratterizzano l'intervento di mitigazione del rischio di frana (o serie di interventi) selezionata dal progettista. Il progettista può quindi selezionare l'intervento di mitigazione del rischio frana sulla base di un'interfaccia a tendina in termini di macro-gruppo e tipo associato, il che significa che quest'ultimo deve essere a conoscenza dei criteri principali da adottare per selezionare correttamente l'intervento più idoneo sulla base della conoscenza delle cause d'innescò della frana. Quindi, sia che si tratti di soluzioni di ingegneria naturalistica o meno, vengono forniti i risultati del tool, ovvero le possibilità di riduzione post operam suggerite (sì o no) dell'estensione dell'area interessata dalla frana, la classe di velocità o di pericolosità e il numero di elementi a rischio. Questi risultati, una volta visualizzati e accettati dal progettista, possono essere salvati ed esportati come nuovo file .DBF contenente i nuovi attributi nel campo "NOTE". Quest'ultimo può essere associato allo shapefile che identifica l'area interessata dalla frana con l'intervento di mitigazione del rischio da frana selezionato e, quindi, caricato automaticamente in RaStEM.

Tool 3 per la stima ante e post operam del numero di persone a rischio per un'area di dissesto definita dal progettista.

Il prodotto finale è un tool di calcolo automatico e interattivo a cui il progettista può fare riferimento per la stima ante e post operam del numero di persone a rischio in un'area interessata da frane (definita

dal progettista) una volta stabiliti gli attributi che caratterizzano le strutture/i beni esposti (cioè tipologia, sotto-tipologia).

Questo tool offre un contributo di conoscenza ai progettisti in merito a una stima affidabile del numero di persone a rischio diretto, indiretto o di perdita della propria abitazione (se applicabile) in condizioni ante o post operam attraverso una differenziazione delle strutture/beni esposti in base alle loro caratteristiche, tenendo conto anche del concetto di esposizione che si riferisce principalmente alla probabilità spazio-temporale delle persone (in media) a rischio da frana. Infatti, secondo il D.P.C.M. del 27 settembre 2021, la valutazione dell'efficacia di un determinato intervento di mitigazione del rischio frana richiede (anche) la dimostrazione che il numero di persone a rischio (diretto, indiretto, perdita dell'abitazione) si riduca nel passaggio dalla condizione ante operam a quella post operam. Considerando la centralità del problema, il tool proposto intende fornire un supporto ai progettisti per operare la suddetta dimostrazione, a condizione che siano note le aree interessate da frane in assenza e in presenza degli interventi. Infatti, la conoscenza di queste aree è prodromica all'identificazione delle strutture/beni esposti a cui è possibile associare il numero di persone a rischio.

A questo proposito, le strutture/beni esposti possono essere raggruppati in sei classi tipologiche (1. tipo di edificio, 2. infrastrutture stradali, 3. attrezzature e strutture urbane, 4. aree soggette a restrizioni, 5. aree suburbane, 6. impianti e altre infrastrutture di rete). Queste ultime, a loro volta, possono essere differenziate in sotto-tipologie (ad esempio, la classe tipologica “tipo di edificio” comprende edifici residenziali, commerciali, artigianali, industriali, uffici/edifici amministrativi).

Una volta definiti dal progettista gli attributi (tipologia, sotto-tipologia) della struttura/bene generico esposto, quest'ultimo può procedere alla stima delle persone a rischio inserendo le informazioni pertinenti nel tool proposto.

Nel caso in cui la classe tipologica sia “tipo di edificio”, queste informazioni riguardano innanzitutto la superficie coperta (S_c) e il numero di piani (n) (da ricavare dalla cartografia tecnica regionale disponibile insieme all'uso di Google Street View) e la superficie pro capite - SAC (per impostazione predefinita, si può ipotizzare 30 m²/persona, a meno che non siano disponibili valori statistici più dettagliati su base regionale o comunale). In questo modo è possibile ricavare la superficie lorda (GFA) (come $S_c \times n$), mentre la probabilità spazio-temporale della persona media esposta ($P_{(S:T)}$) è fissata in base alla sottoclasse tipologica dell'edificio esposto. Infine, il numero di persone a rischio diretto si ottiene automaticamente come $GFA / (SAC \times P_{(S:T)})$; il numero di persone a rischio indiretto viene ottenuto automaticamente come $SFA / [SAC \times (1 - P_{(S:T)})]$; mentre il numero di persone a rischio di perdere la propria abitazione viene stabilito dal progettista.

Per quanto riguarda le “infrastrutture stradali”, le informazioni riguardano il traffico medio giornaliero - TGM (in diversi casi i dati sono disponibili sul sito web dell'A.N.A.S. - <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/osservatorio-del-traffico/dati-traffico-medio-giornaliero-annuale>) e il numero medio di persone per veicolo – P_{AVE} (ad esempio, pari a 3). Il numero di persone a rischio diretto può essere ottenuto come lunghezza del tratto in frana \times numero di veicoli con una lunghezza di 4 m che entrano nel tratto in frana per singola carreggiata \times numero di carreggiate \times numero medio di persone per veicolo; il numero di persone a rischio indiretto si ottiene automaticamente come $TGM \times P_{AVE}$.

Passando alle “attrezzature e strutture urbane”, nel caso della sotto-tipologia degli spazi verdi attrezzati, è possibile distinguere tra parchi urbani: 300 m²/utente, verde regolamentato: 35 m²/utente, verde attrezzato per lo sport: 15 m²/utente, verde per giochi per bambini: 10 m²/utente. Per quanto riguarda la sotto-tipologia dei parcheggi pubblici, il numero di persone a rischio diretto si ottiene automaticamente come superficie del parcheggio/12 m² (ipotizzando una media di due persone per auto) $\times P_{(S:T)}$. Per quanto riguarda invece le sotto-tipologie scuole, strutture di interesse comune, ospedali, uffici amministrativi (comuni, province, ecc.), strutture ricettive e ricreative (alberghi, cinema), beni culturali (monumenti, musei), in assenza di dati disponibili si può procedere come per la tipologia 1, tenendo presente che i valori associabili alle singole informazioni sono altamente variabili all'interno della stessa sotto-tipologia.

Le tipologie “aree soggette a restrizioni” e “aree suburbane” corrispondono generalmente ad aree vaste. Di conseguenza, occorre considerare gli edifici e le strade presenti al loro interno e procedere come per le tipologie 1 e 2; mentre per gli “impianti e altre infrastrutture di rete”, il numero di persone a rischio dipende in larga misura dall'impianto e dal tipo di infrastruttura, nel caso in cui sia associato alla presenza funzionale di dipendenti.

Da un punto di vista operativo, il tool richiede come input il file .DBF associato al file shapefile dell'area interessata dalla frana in esame, compresi gli attributi (cioè codice di identificazione, tipologia e sotto-tipologia) che caratterizzano la struttura/il bene generico esposto. A seconda del tipo di struttura esposta, il progettista può definire, sulla base di un'interfaccia a tendina, le informazioni pertinenti necessarie per la stima del numero di persone a rischio diretto, indiretto o di perdita dell'alloggio (se applicabile). Ad esempio, nel caso in cui la classe tipologica sia “tipo di edificio”, l'utente deve fornire informazioni sulla superficie coperta (Sc), il numero di piani (n) e la superficie pro capite (SAC), a cui sono associati diversi valori di probabilità spazio-temporale della persona media esposta ($P_{(S:T)}$) in base alla sotto-tipologia (ad esempio $P_{(S:T)} = 0,33$ per gli edifici scolastici o

ospedalieri; oppure $P_{(S:T)} = 1,00$ per gli edifici residenziali). Se la struttura esposta è un'infrastruttura stradale, le informazioni richieste riguardano il traffico medio giornaliero (TGM) in base alla sotto-tipologia (autostrada, strada extraurbana o locale, ecc.), il numero medio di persone per veicolo, la lunghezza del tratto interessato dalla frana, il numero di veicoli con una lunghezza di 4 m che entrano nel tratto interessato dalla frana per singola carreggiata e il numero di carreggiate. Quindi, i numeri (ante o post operam) di persone a rischio diretto, indiretto e di perdita dell'alloggio (se applicabile) saranno forniti automaticamente come risultati.

Tool 4 per la stima della vulnerabilità degli elementi fisici (edifici/strade) a rischio per un'area di dissesto a cinematica lenta definita dal progettista.

Il prodotto finale è un tool computazionale automatico e interattivo a cui il progettista può fare riferimento per la stima della vulnerabilità fisica associata agli elementi (edifici/tratti stradali) a rischio che interagiscono con un'area interessata da una frana lenta predefinita dal progettista ante o post operam. La sua operatività richiede l'identificazione degli elementi esposti insieme alle loro caratteristiche (ad esempio, tipologia strutturale, tipo di fondazione, numero di piani, stato di manutenzione degli edifici), il livello di severità del danno registrato o previsto - DL (da classificare secondo un sistema di classificazione dei danni) e il parametro di intensità associato - IP (ad esempio, la velocità media annuale, il cedimento assoluto/differenziale da selezionare sulla base dei dati di monitoraggio).

Questo tool intende fornire supporto al progettista nella valutazione del grado di perdita di edifici o strade che interagiscono con frane a lento scorrimento attraverso curve di fragilità e vulnerabilità. Le prime forniscono, per un dato elemento esposto (ad esempio un edificio o un tratto stradale) selezionato casualmente tra quelli che compongono il campione (omogeneo) di elementi esposti oggetto di indagine, la probabilità di raggiungere o superare un determinato DL per un valore fisso dell'IP. Il secondo fornisce il livello medio previsto di gravità del danno per il campione (omogeneo) di elementi esposti oggetto di indagine.

La generazione di questi strumenti predittivi richiede innanzitutto l'identificazione degli elementi a rischio sovrapponendo l'area interessata da frane lente - ante o post operam definita dal progettista sulla base di una mappa ufficiale dell'inventario delle frane (se disponibile) o di dati d'archivio documentati - con una mappa topografica/urbana ufficiale dell'area di studio. Quindi, per ogni elemento esposto identificato, vengono assegnati il livello di severità del danno e il valore del parametro di intensità. Per quanto riguarda il livello di severità del danno, registrato durante i rilievi

in situ o previsto in futuro su base euristica, esso può essere differenziato in quattro classi di danno (D0 = nessun danno; D1 = generico - danno possibile ma non definito; D2 = lieve - danno che non compromette la funzionalità; D3 = medio - danno che compromette la funzionalità; D4 = grave - danno strutturale o perdita totale) adattando la precedente scheda informativa RenDiS (D.P.C.M. del 27 settembre 2021). Per quanto riguarda il parametro di intensità, esso dovrebbe essere selezionato in base alla disponibilità di dati di monitoraggio relativi alla velocità media annuale o a parametri più raffinati che descrivono la risposta dell'elemento esposto (ad esempio, cedimenti assoluti o differenziali).

Entrambe le serie di informazioni possono essere utilizzate proficuamente per generare curve di fragilità utilizzando la funzione di distribuzione log-normale che fa uso di due parametri di fragilità (mediana e deviazione standard). Questi ultimi sono stimati adottando il metodo della massima verosimiglianza (ML) (Ferlisi et al., 2021). Quindi, i risultati del tool, ovvero la probabilità di raggiungere/superare un determinato DL per un valore fisso dell'IP, vengono utilizzati come input per generare la curva di vulnerabilità. In particolare, per ogni valore di IP, la DL media viene calcolata adottando un modello di regressione come la funzione iperbolica tangente, i cui quattro coefficienti possono essere determinati adattando i dati empirici utilizzando procedure standard (cioè, il metodo dei minimi quadrati). I risultati possono essere utilizzati dal progettista per prevedere la DL media in base a un dato scenario di evoluzione della frana (e all'IP associato).

Da un punto di vista operativo, i passaggi logici sopra descritti vengono trasposti in un linguaggio di programmazione le cui operazioni seguono la stessa struttura degli altri strumenti presentati. Si prevede che l'utente possa caricare un file .DBF come input associato al file shapefile dell'area interessata da frane lente, compresi i suoi attributi (ad esempio, codice di identificazione, tipologia e sotto-tipologia) e quelli degli elementi esposti (edifici/tratti stradali). Quindi, gli attributi in termini di DL e IP associati agli elementi esposti possono essere assegnati sulla base di interfacce a tendina e la probabilità di raggiungere/superare un determinato DL per un elemento a rischio selezionato casualmente e il valore medio DL per tutti gli elementi a rischio che compongono il campione (omogeneo) in esame saranno automaticamente forniti come risultati per un dato scenario di evoluzione della frana.

9. CONCLUSIONI

La normativa in materia di rischio da frana vanta in Italia una forte tradizione per la consapevolezza, da parte della società, di convivere con numerosi pericoli naturali, testimoniata dal sistematico avanzamento delle conoscenze tecnico-scientifiche e dall'evoluzione dei dettati legislativi in materia di difesa del suolo, e persegue il fine di una corretta interazione tra zone edificate e relative infrastrutture, presenti o da realizzare, con aree sede di frane esistenti o che saranno sede di frane potenziali.

Tuttavia, sebbene il fine ultimo dei Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (L. 365/2000) è quello di una pianificazione avanzata del territorio a supporto di una zonazione del rischio da frane esistenti e potenziali, i cui benefici sono evidenti in quanto le Norme di attuazione che li accompagnano hanno reso possibile una pianificazione territoriale più rispettosa dei pericoli presenti sul territorio, un limite è rappresentato dal mancato legame con la progettazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio da frana per i quali è richiesta la relazione di compatibilità idrogeologica che è chiamata a confrontare una zonazione qualitativa del rischio derivanti da studi a scala media (essenzialmente 1:25.000) con opere ideate e progettate a scala di dettaglio ($> 1:5.000$). È pertanto evidente la necessità di introdurre azioni volte a rendere dialoganti gli aspetti tipici della pianificazione con quelli propri della progettazione attraverso un uso appropriato di metodi di analisi, dati di input, scale topografiche a base dei calcoli e di rappresentazione degli studi. Da questo punto di vista la Normativa tecnica ha fatto registrare passi in avanti con la Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e lo sviluppo della nuova versione degli Eurocodici, che aprono la strada a concetti quali pericolosità, rischio e sua mitigazione a seguito della realizzazione degli interventi strutturali, oltre a quanto più recentemente proposto dall'Associazione Geotecnica Italiana e dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) con le "Linee Guida per la progettazione degli interventi di mitigazione del rischio di frana" (AGI-ISPRA, 2022).

Infine, il rischio da frana a cui siamo esposti può diventare davvero un'opportunità di sviluppo del Paese, anche in grado di dare risposta compiuta alle domande poste nell'Introduzione, se si decide di capirlo fino in fondo attraverso un incremento delle conoscenze (ad esempio, basato sulla valorizzazione di dati di monitoraggio con tecniche tradizionali e innovative) che conduca progressivamente da analisi di tipo qualitativo (quali quelle attualmente adottate per la redazione della cartografia ufficiale di zonazione del rischio) ad analisi di tipo quantitativo, anche mediante l'accennata armonizzazione tra la normativa di settore e quella tecnica. Solo così sarà possibile

pervenire a strumenti di tipo previsionale che, distinguendo compiutamente le conseguenze prioritariamente attese sulle persone esposte da quelle sulle cose, abilitino alla messa in atto di azioni mirate di tipo preventivo che coniugano sapientemente interventi strutturali e non strutturali, anche in un'ottica più ampia di sostenibilità di sistema (AGI, 2021).

Bibliografia

- AGI (2021). La Gestione Sostenibile del Rischio da Frana in Italia. A cura di: Cascini L., Ciurleo M., Ferlisi S., Soccodato C., Edizioni AGI, Roma
- AGI-ISPRA (2022). Progettazione degli Interventi di Mitigazione del Rischio da Frana. A cura di: Cascini L., Ferlisi S., Moraci N., Soccodato C., Edizioni AGI, Roma
- AGS (2007). Practice note guidelines for landslide risk management. Australian Geomechanics Society. Australian Geomechanics, 42(1):62-114
- Airò Farulla C. (2001). Analisi di stabilità dei pendii. I metodi dell'equilibrio limite. Hevelius Edizioni, Benevento, 204 pp.
- Anderson M.G., Howes S. (1985). Development and application of a combined soil water slope stability model. Quarterly Journal of Engineering Geology, pp. 225-236
- Annan K. (2004). Foreword. In: Living with Risk A global review of disaster reduction initiatives. Volume I, United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR)
- Bianchini S., Herrera G., Mateos R.M., Notti D., Garcia I., Mora O., Moretti S. (2013). Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry. Remote Sensing, 5(12):6198-6222
- Burghignoli A., Desideri A. (1986). Efficienza dei drenaggi. Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, Vol. III, pp. 293-298.
- Burland J.B. (1995). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Invited Special Lecture, Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, IS-Tokyo '95, pp. 1189-1201
- Burland J.B., Broms B.B., de Mello V.F.B. (1977). Behaviour of foundations and structures. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol. 2, pp. 495-546
- Calò F., Ardizzone F., Castaldo R., Lollino P., Tizzani P., Guzzetti F., Lanari R., Angeli M.C., Pontoni F., Manunta M. (2014). Enhanced landslide investigations through advanced A-DInSAR techniques: the Ivancich case study, Assisi, Italy. Remote Sensing Environment, 142:69-82
- Calò F., Calcaterra D., Iodice A., Parise M., Ramondini M. (2012). Assessing the activity of a large landslide in southern Italy by ground-monitoring and SAR interferometric techniques. International Journal of Remote Sensing, 33(11):3512-3530
- Calvello M., Peduto D., Arena L. (2017). Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides. Landslides, 14(2):473-489
- Calvetti F., di Prisco C. (2007). Linee guida per la progettazione di gallerie paramassi. Ed. Starrylink, 184 pp.
- Capobianco V., Uzielli M., Kalsnes B., Choi J.C., Strout J.M., von der Tann L., Steinholt I.H., Solheim A., Nadim F., Lacasse S. (2022). Recent innovations in the LaRiMiT risk mitigation tool:

implementing a novel methodology for expert scoring and extending the database to include nature-based solutions, *Landslides*, 19:1563-1583

Cascini L. (2005). La gestione scientifica dell'emergenza idrogeologica del maggio 1998 nella Regione Campania. Monografia, Rubbettino Editore, pp. 278.

Cascini L. (2014). Criteri di analisi e gestione del rischio da frana: dal Governo centrale alle comunità locali. Relazione Generale. In: La geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali. Atti del XXV Convegno Nazionale di Geotecnica, Baveno, 4-6 giugno 2014. Edizioni AGI, Roma, Vol. 1, pp. 103-150

Cascini L. (2015). Geotechnics for urban planning and land use management. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 49(4):7-62

Cascini L., Bonnard Ch., Corominas J., Jibson R., Montero-Olarte J. (2005). Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. A cura di: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E., *Landslide Risk Management*, Taylor and Francis, London, pp. 199-235

Cascini L., Ferlisi S., Vitolo E. (2008). Individual and societal risk owing to landslides in the Campania region (southern Italy). *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2(3):125-140

Cascini L., Fornaro G., Peduto D. (2009). Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide-affected areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(6):598-611

Cascini L., Fornaro G., Peduto D. (2010). Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 112:29-42

Cascini L., Guida D., Sorbino G. (2005). Il Presidio Territoriale. Una esperienza sul campo. Monografia, Rubbettino Editore, 130 pp.

Cascini L., Peduto D., Pisciotto G., Arena L., Ferlisi S., Fornaro G. (2013). The combination of DInSAR and facility damage data for the updating of slow-moving landslide inventory maps at medium scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13:1527-1549

Cascini L., Sorbino G. (2003). Opere di protezione per i fenomeni di colata. Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino XIX Ciclo. Torino, 4-6 novembre 2003.

Cascini L., Sorbino G., Cuomo S., Ferlisi S. (2014). Seasonal effects of rainfall on the shallow pyroclastic deposits of the Campania region (southern Italy). *Landslides*, 11(5):779-792

Cascini L., Versace P. (1986) - Eventi pluviometrici e movimenti franosi – Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, vol. 3, pp. 171-184

Cascini, L. (2004). The flowslides of May 1998 in the Campania region, Italy: the scientific emergency management. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 38(2):11-44

Castellanos Abella, E.A., van Westen, C.J. (2007). Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation, *Landslides* 4(4): 311-325.

Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J.-P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M. G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V.,

- Hervás J., Smith J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73:209-263
- Cotecchia F., Santaloia F., Lollino P., Vitone C., Pedone G., Bottiglieri O. (2016). From a phenomenological to a geomechanical approach to landslide hazard analysis. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9):1004-1031
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council, Washington DC, Special Report 247, Chapter 3, pp 36-75
- De Chiara G., Ferlisi S., Sacco C. (2015). Analysis at medium scale of incident data dealing with flow-like phenomena in the Campania region (southern Italy). *Proceedings of the XVI ECSMGE on "Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development"*, Edinburgh (Scotland, United Kingdom), 13-17 September 2015. ICE Publishing, Thomas Telford Ltd., London, pp. 1861-1866
- Di Fonzo G. (2008). Analisi sperimentale e numerica del comportamento meccanico di chiodi infissi in pozzolana non satura. Tesi per il conseguimento del titolo di dottore di ricerca in "Ingegneria delle Costruzioni". Università degli Studi di Napoli "Federico II".
- Evangelista A. (1997). Sistemi drenanti per la stabilizzazione dei pendii: tipi e schemi di funzionamento. *Interventi di stabilizzazione dei pendii*, CISM, Udine, pp. 387-423
- Faella C., Nigro E. (2003). A hypothesis of technical code on the structural design and repairing in urban areas with high debris flow risk. "Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation", Napoli. Patron Editore, Vol. I, pp. 195-198.
- Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z., per conto di JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102:85-98
- Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: *Landslide Risk Management*. A cura di: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E., Taylor and Francis, London, pp. 3-26
- Ferlisi S., Cascini L., Sacco C., Scarpelli G. (2014). Prospettive di sviluppo per la Normativa Tecnica sulla mitigazione del rischio da frana con interventi strutturali. In: *La geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali*. Atti del XXV Convegno Nazionale di Geotecnica, Baveno, 4-6 giugno 2014 – Vol. 2, pp. 525-532. Edizioni AGI, Roma
- Ferlisi S., De Chiara G. (2016). Risk analysis for rainfall-induced slope instabilities in coarse-grained soils: Practice and perspectives in Italy. In: Aversa S., Cascini L., Picarelli L., Scavia C. (Eds.), *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. Atti del XII International Symposium on Landslides – Napoli, 12-19 giugno 2016. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, Vol. 1, pp. 137-154
- Ferlisi S., De Chiara G., Cascini L. (2016). Quantitative risk analysis for hyperconcentrated flows in Nocera Inferiore (southern Italy). *Natural Hazards*, 81 (Supplement 1): S89-S115
- Ferlisi S., Nicodemo G., Peduto D. (2018) Empirical Fragility Curves for Masonry Buildings in Slow-Moving Landslide-Affected Areas of Southern Italy. In: Kallel A, Ksibi M, Ben Dhia H, Khélifi N (eds) *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and*

- Surrounding Regions, EMCEI 2017. Advances in Science, Technology and Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham, pp 1825-1828
- Ferlisi S., Peduto D., Gullà G., Nicodemo G., Borrelli L., Fornaro G. (2015) The use of DInSAR data for the analysis of building damage induced by slow-moving landslides. In: Lollino G, Giordan D, Crosta GB, Corominas J, Azzam R, Wasowski J, Sciarra N (eds), Engineering Geology for Society and Territory, Springer International Publishing, Switzerland, Vol 2, pp 1835-1839
- Galli A., di Prisco C. (2013). Displacement-based design procedure for slope-stabilizing piles. Canadian Geotechnical Journal, 50:41-53
- GCO (1984). Geotechnical Manual for slopes. Geotechnical Control Office, Engineering Development Department.
- GEO (1998). Landslides and Boulder Falls from Natural Terrain: Interim Risk Guidelines. GEO Report No. 75. Geotechnical Engineering Office, The Government of Hong Kong Special Administrative Region, 183 pp.
- Gray D.H., Leiser A.J. (1982). Biotechnical slope protection and erosion control. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 271 pp.
- Gullà G., Ferlisi S., Nicodemo G., Peduto D. (2017a). Un approccio metodologico per la gestione del rischio in aree urbane affette da frane a cinematica lenta. In: Moraci N, Soccodato C (eds) La geotecnica nella conservazione e tutela del patrimonio costruito, Proceeding of the 26th Italian Geotechnical Congress, Rome 20-22 June 2017, © 2017 Associazione Geotecnica Italiana, Roma, Vol. 2, pp. 595-603
- Gullà G., Peduto D., Borrelli L., Antronico L., Fornaro G. (2017b). Geometric and kinematic characterization of landslides affecting urban areas: the Lungro case study (Calabria, Southern Italy). Landslides, 14(1):171-188
- Herrera G., Gutiérrez F., García-Davalillo J.C., Guerrero J., Notti D., Galve J.P., Fernández-Merodo J.A., Cooksley G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). Remote Sensing Environment, 128:31-43
- Ho K.K.S. (2004). Recent advances in geotechnology for slope stabilization and landslide mitigation – perspective from Hong Kong. In: Lacerda W., Ehrlich M., Fontoura S.A.B. & Sayão A.S.F. (Eds.). Landslides: Evaluation and Stabilization. Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro (Brazil), June 28-July 2, 2004, © 2014 Taylor and Francis Group, London, Vol. 2, pp. 1507-1560
- Ho K.K.S., Leroi E., Roberds, W.J. (2000). Quantitative risk assessment applications, myths and future direction. Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne (Australia), 9–24 November 2000, pp. 269-312. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc.
- Hungr O., Corominas J., Eberhardt E. (2005) Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.), Landslide risk management. Taylor and Francis, London, pp. 99-128
- Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N. (2001) A review of the classification of landslides of the flow-type. Environmental & Engineering Geoscience, 7(3):221-238

- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11:167-194
- Hutchinson J.N. (1977). Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and type of slope movements. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 16:151-156.
- ISPRA (2023). RaStEM: uno strumento di supporto per la progettazione degli interventi di difesa del suolo. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Manuali e linee guida 202/2023, Roma, 47 pp.
- ISPRA (2025). Rapporto sul Dissesto Idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2024. Rapporti 415/2025, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, 206 pp.
- Jappelli R. (1999). Principi di progettazione geotecnica. Edizioni Hevelius, Benevento, 168 pp.
- Leroi E., Bonnard Ch., Fell R., McInnes R. (2005) Risk assessment and management. In: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.), *Landslide risk management*. Taylor and Francis, London, pp 159-198
- Leroueil S., Locat J., Vaunat J., Picarelli L., Faure R. (1996). Geotechnical characterisation of slope movements. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*. Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 53-74
- Linnerooth-Bayer J., Scolobig A., Ferlisi S., Cascini L., Thompson M. (2016). Expert engagement in participatory processes: translating stakeholder discourses into policy options. *Natural Hazards*, 81 (Supplement 1):S69-S88
- Lo D.W.K. (2000). Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design. Special Project Report No. SPR 1/2000, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong (GEO Report No. 104)
- Lumb P. (1975) – Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, pp. 31-65.
- Macciotta R., Derek Martin C., Morgenstern N.R., Cruden D.M. (2016). Quantitative risk assessment of slope hazards along a section of railway in the Canadian Cordillera—a methodology considering the uncertainty in the results. *Landslides*, 13:115-127
- Mansour M.F., Morgenstern N.I., Martin C.D. (2011). Expected damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8(1):117-131
- Musso A. (1997). Limitazione nell'uso di pendii con ridotto margine di sicurezza. A cura di: Pellegrino A., *Interventi di stabilizzazione dei pendii*. CISM, Udine, pp. 449-474
- Nadim F., Einstein H., Roberds W. (2005). Probabilistic stability analysis for individual slopes in soil and rock. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture, E. Eberhardt (eds.). *Landslide Risk Management*, pp. 63–98. London: Taylor and Francis.
- Ng K.C., Parry S., King J.P., Franks C.A.M., Shaw R. (2002). Guidelines for natural terrain hazard studies. Special Project Report No. SPR 1/2002, Geotechnical Engineering Office, 136 pp.

- Nicodemo G., Peduto D., Ferlisi S., Gullà G., Borrelli L., Fornaro G., Reale D. (2017). Analysis of building vulnerability to slow-moving landslides via A-DInSAR and damage survey data. In: Mikos M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (eds.) *Advancing Culture of Living with Landslides, Proceedings of the 4th World Landslide Forum – WLF 2017*, Ljubljana, Slovenia, May 29 – June 02, 2017, © 2017 Springer International Publishing AG 2017, Vol. 2, pp. 889-907
- NTC (2018). Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. del 17 gennaio 2018
- Palmisano F., Vitone C., Cotecchia F. (2018). Assessment of Landslide Damage to Buildings at the Urban Scale. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 32(4):04018055
- Peduto D., Cascini L., Arena L., Ferlisi S., Fornaro G., Reale D. (2015). A general framework and related procedures for multiscale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105:186-210
- Peduto D., Ferlisi S., Nicodemo G., Reale D., Pisciotta G., Gullà G. (2017). Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales. *Landslides* 14(6):1993-2007
- Peduto D., Nicodemo G., Caraffa M., Gullà G. (2018). Quantitative analysis of consequences to masonry buildings interacting with slow-moving landslide mechanisms: a case study. *Landslides*, 15(10):2017-2030
- Rahardjo H., Leong E.C. (2002). Horizontal drains in unsaturated slopes. *Atti della Third International Conference on Unsaturated Soils*. 10-13 March, Recife, Brazil, 2, pp. 773-777
- Roberds W. (2005). Estimating temporal and spatial variability and vulnerability. In: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.) *Landslide risk management*, Taylor and Francis, London, pp. 129-157
- Rogers J.D. (1992). Recent developments in landslide mitigation techniques. In: *Landslides/landslide mitigation*. Slosson J.E., Keene A.G., Johnson J.A. eds. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, IX, pp. 95-118
- Shinozuka M., Feng M.Q., Lee J., Naganuma T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12):1224-1231
- SNPA (2021). Linee Guida per il monitoraggio delle frane. Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente. Linee guida SNPA n. 32/2021, 286 pp.
- Son M., Cording E.J. (2005). Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2):162-177
- Sorbino G. (2007). The role of control works in the risk mitigation framework. Lezione svolta presso la LARAM School (www.laram.unisa.it), Università degli Studi di Salerno.
- Strouth, A., McDougall, S. (2021). Societal risk evaluation for landslides: historical syn-thesis and proposed tools. *Landslides*, 18:1071-1085
- Sun H.W. (1998). Review of fill slope failures in Hong Kong. GEO Special Project Report SPR 4/98, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong.

- Tofani V., Raspini F., Catani F., Casagli N. (2014) Persistent scatterer interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring. In: Sassa K., Canuti P., Yueping Y. (eds.), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment Methods of Landslide Studies 2*. Springer International Publishing, pp. 351-357
- Van Dine D.F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria B.C., Work. Pap. 08/1996, 68 pp.
- van Westen C.J., Castellanos Abella E.A., Sekhar L.K. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*, 102(3-4):112-131
- Varnes and the International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and other Mass Movements on Slopes (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Parigi, Natural Hazards 3, 63 pp.
- Wasowski J., Bovenga F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174:103-138
- Wong H.N. (2005). Landslide risk assessment for individual facilities. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture, E. Eberhardt (eds.) *Landslide Risk Management*: 237-296. London: Taylor and Francis.
- Wong H.N., Ho, K.K.S., Chan Y.C. (1997). Assessment of consequence of landslides. In D.M. Cruden, R. Fell (eds.), *Landslide Risk Assessment*, pp. 111-149. Rotterdam: Balkema.