

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



## FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE  
IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA,  
GEOTECNICA E AMBIENTALE

TESI DI LAUREA

SOGLIE PLUVIOMETRICHE PER LA PREVISIONE DI FRANE  
METEOINDOTTE

RELATORE

Ch.mo Prof. Ing. Gianfranco Urciuoli

CORRELATORE

Dott. Ing. Marianna Pirone

CANDIDATO

Claudio Cavaliere  
matr. N49/10

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

# Indice

---

## INTRODUZIONE

### CAPITOLO 1

#### LE COLATE RAPIDE

1.1	INTRODUZIONE.....	pag. 6
1.2	LE FRANE: SCHEMATIZZAZIONE.....	pag. 6
1.3	CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE.....	pag. 7
1.4	LE COLATE RAPIDE.....	pag. 11
1.4.1	Evoluzione	
1.4.2	Fattori predisponenti ed innescanti delle colate rapide	
1.4.3	Colate di fango nella regione Campania: contesti geologici	

### CAPITOLO 2

#### MONITORAGGIO, ANALISI E PREVISIONE DELL'EVENTO

2.1	INTRODUZIONE.....	pag.15
-----	-------------------	--------

2.2 MONITORAGGIO.....	pag.15
-----------------------	--------

2.2.1 Strumenti e tecniche di misura

2.3 ANALISI.....	pag.17
------------------	--------

2.4 PREVISIONE.....	pag.18
---------------------	--------

### **CAPITOLO 3**

#### **SOGLIE PREVISIONALI PER L'INNESCO DI FRANE METEOINDOTTE**

3.1 PREMESSA.....	pag.20
-------------------	--------

3.2 DEFINIZIONE DI SOGLIA.....	pag.20
--------------------------------	--------

3.3 TIPOLOGIE DI SOGLIE.....	pag.21
------------------------------	--------

3.3.1 Soglie derivanti da modelli fisicamente basati

3.3.2 Soglie derivanti da modelli empirici

3.4 SOGLIE EMPIRICHE IN TERMINI DI INTENSITA' E DURATA (I-D) .....	pag.25
--	--------

3.5 SOGLIE EMPIRICHE IN TERMINI DI PIOGGIA CUMULATA ANTECEDENTE.....	pag.30
--	--------

3.6 SOGLIE EMPIRICHE DEFINITE PER LA CAMPANIA.....	pag.32
--	--------

3.7 ESEMPI DI SISTEMI DI ALLARME E PREVENZIONE BASATI SU SOGLIE PLUVIOMETRICHE .....	pag.32
--	--------

3.8 VANTAGGI E LIMITI DELLE SOGLIE PROPOSTE.....	pag.33
--	--------

## **CONCLUSIONI**

## **Bibliografia**

## INTRODUZIONE

Le colate di fango sono, tra le tipologie di frane esistenti, quelle che provocano il maggior numero di danni. La massa instabile assume caratteristiche simili ad un fluido ad alta viscosità ed è dotata di una velocità variabile in base a numerosi fattori, quali le caratteristiche geometriche e granulometriche del versante di frana, il contenuto d'acqua, e la presenza di ostacoli naturali.

In Campania, le colate rapide si verificano generalmente in pendii con un assetto stratigrafico costituito da strati piroclastici o comunque detritici di diverso spessore, giacenti su un substrato roccioso. Queste hanno provocato recenti calamità: Sarno e Quindici nel maggio 1998, Cervinara nel dicembre 1999, Ischia nell'aprile 2006.

Le cause di innesco principali sono senz'altro legate a fattori climatici ed antropici. In genere la frana inizia con un piccolo smottamento ad alta quota, in corrispondenza di punti deboli (testate di valloni, strade, etc), i terreni, spesso saturi, si mobilizzano e "scorrono" a valle con notevole energia e con elevatissima capacità erosiva. La distanza di propagazione dipende dall'energia cinetica posseduta dalla massa in movimento, dalla morfologia del versante, e dalla presenza o meno di ostacoli naturali in grado di dissipare la suddetta energia.

Per la mitigazione del rischio nei confronti delle colate rapide, il monitoraggio costituisce uno strumento fondamentale perché consente la conoscenza e lo studio delle grandezze protagoniste dei fenomeni in atto e la conseguente valutazione delle condizioni di sicurezza di un versante. Esso, inoltre, si avvale di una serie di strumenti all'avanguardia atti a misurare le grandezze suddette, quali, ad esempio, tensiometri, sonde TDR e stazioni meteorologiche. La fase di monitoraggio è strettamente legata a quella di analisi delle condizioni idrologiche al contorno, la cui conoscenza risulta necessaria per la formulazione di modelli di versante e soglie pluviometriche.

Accanto ad una fase di analisi e monitoraggio, infine, è indispensabile un'azione di previsione dell'evento franoso che possa salvaguardare la popolazione e i beni di valore, nonché consentire lo sviluppo di piani di emergenza che regolino le fasi successive alla catastrofe.

I criteri adottati generalmente per la predizione sono per lo più empirici e cioè basati sull'analisi statistica degli eventi meteorologici che hanno condotto a movimenti franosi in un determinato contesto geomorfologico. All'interno di tali approcci empirici le variabili utilizzate sono principalmente: intensità di pioggia, durata di pioggia e precipitazioni cumulate. Pertanto si

elaborano le cosiddette soglie pluviometriche empiriche, definite come le curve che rappresentano il contorno inferiore delle coppie di punti in concomitanza dei quali si è verificato un evento franoso. Questa tipologia di soglia è quella attualmente più diffusa e, data la grande numerosità di soglie esistenti in letteratura, si è operata una classificazione che le suddivide in base a due criteri fondamentali: l'estensione dell'area di validità e la scelta delle variabili meteorologiche prese in considerazione. Si avranno, quindi, soglie globali, regionali o locali, a seconda della scala geografica di riferimento, e soglie espresse in termini di intensità - durata o piogge antecedenti - intensità in base alle variabili scelte.

Un'altra tipologia di soglia pluviometrica è fondata su analisi fisiche e matematiche di tutti i fattori che determinano il fenomeno franoso, definendoli nello spazio e nel tempo. Le soglie derivanti da modelli su base fisica sono molto meno diffuse e sono estremamente complesse da determinare poiché, come già accennato, richiedono conoscenze dettagliate su tutte le variabili in gioco e sulle loro interazioni; eppure queste tipologie di soglie, laddove è possibile formularle, permettono un'analisi e quindi una previsione più dettagliata.

# CAPITOLO 1

## Le colate rapide

### 1.1 Introduzione

Le frane sono fenomeni naturali caratterizzati da spostamento o caduta di corpi rocciosi o sciolti e rappresentano una delle principali cause dell'evoluzione morfologica dei versanti, seconde solo ai terremoti. Le frane possono essere improvvise e veloci, o lente restando attive per decine di anni. In natura ne esistono numerose tipologie e possono essere classificate in base: al tipo di materiale coinvolto (terreni sciolti, detriti di falda, materiale roccioso) e al tipo di movimento.

### 1.2 Le frane: schematizzazione

Nelle frane più comuni si possono distinguere tre parti principali (Figura 1.1):

· *Zona di scorrimento:*

- la corona (coronamento): rappresenta la zona sommitale da cui ha inizio il movimento franoso; questa zona, riscontrabile pressoché in tutti i tipi di frana, presenta una forma ad arco e rappresenta parte del versante che delimita superiormente la frana;
- la scarpata principale: zona del versante da cui ha avuto origine il distacco del materiale;
- superficie di frattura: superficie lungo la quale è avvenuto il movimento;
- corpo principale: costituisce tutto il materiale interessato dal movimento, caratterizzato dall'aver uno spessore decrescente dalla zona di distacco fino all'inizio di quella di accumulo;

· *Corpo principale:*

- la testata: parte più alta della frana, al contatto con la scarpata principale;
- le scarpate secondarie: superfici ripide che interrompono la continuità del materiale franato;
- fratture longitudinali e/o trasversali: indicative di movimenti relativi delle singole porzioni del corpo di frana.

· *Zona di accumulo:*

- la superficie di separazione: superficie lungo la quale si ha il contatto tra il materiale franato e quello sottostante;

- il piede: porzione del materiale dislocato che si è accumulata a valle del margine inferiore della superficie di rottura.

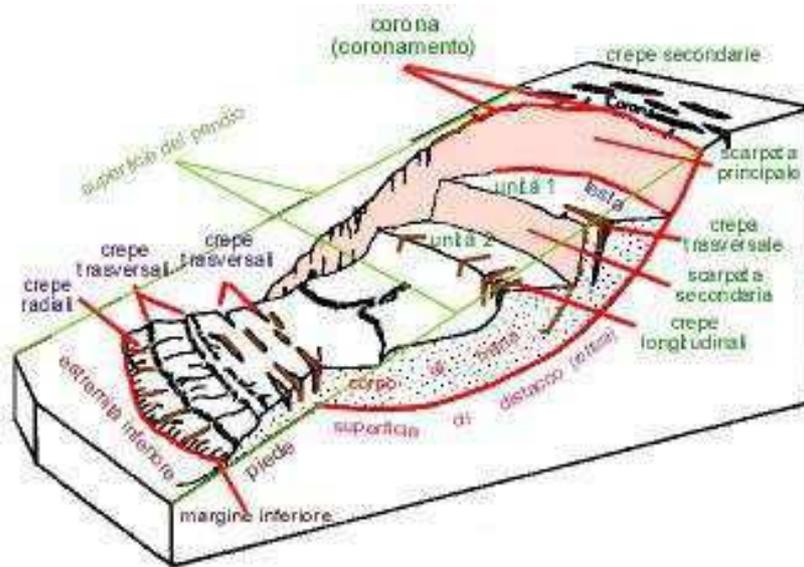


Figura 1. 1: Schema di una frana

### 1.3 Classificazione delle frane

Se si considerano le *modalità del distacco*, le frane possono essere classificate secondo le seguenti categorie:

- *Frane di crollo (falls)*, consistenti in un distacco improvviso di masse rocciose fortemente inclinate o a strapiombo causato principalmente dalla presenza di fratture o discontinuità strutturali all'interno del corpo roccioso (fig.1.2);

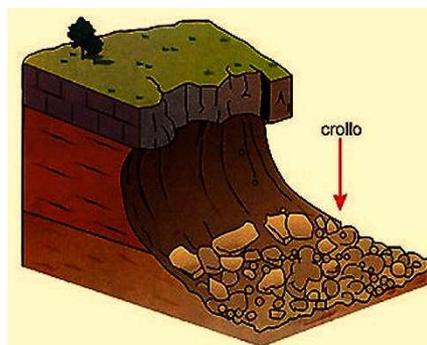


Figura 1.2 : Frana per crollo

- *Ribaltamenti (topples)*, frane in cui il movimento è dovuto a forze che causano un momento ribaltante attorno ad un punto di rotazione situato al di sotto del baricentro della massa interessata (fig.1.3);

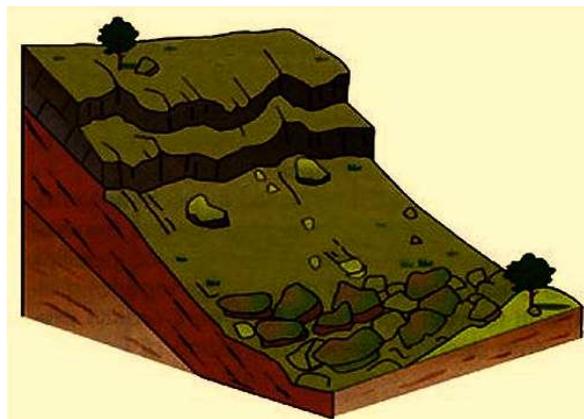


**Figura 1.3: Frana per ribaltamento**

- *Scorrimenti o scivolamenti (Slides)*. Possono essere di due tipi, a seconda della geometria della superficie di scorrimento:

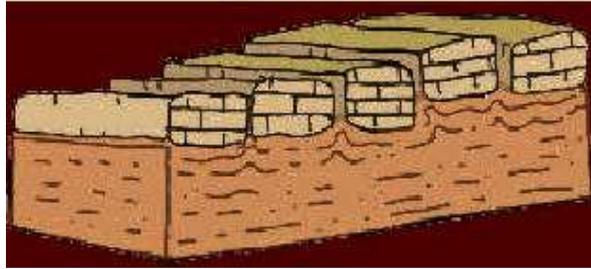
*rotazionali*, in cui il movimento si verifica lungo una superficie di rottura concava verso l'alto ed è dovuto a forze che producono un momento di rotazione attorno ad un punto posto al di sopra del centro di gravità della massa;

*traslativi*, in cui il movimento si verifica in prevalenza lungo una superficie piana o debolmente inclinata, ed è causato dalla presenza di discontinuità (faglie, contatto di terreni di diversa natura) (fig.1.4);



**Figura 1.4: Frana per scivolamento**

- *Espansioni laterali*: sono dei movimenti dovuti ad un assetto litografico caratterizzato dalla presenza di materiali rigidi “galleggianti “ in una matrice di terreni plastici. Proprio per queste caratteristiche, le espansioni laterali sono spesso dovute a liquefazioni o a deformazioni plastiche del materiale sottostante , che provoca la progressiva fatturazione del materiale rigido (fig.1.5);



**Figura 1.5: Frana per espansione laterale**

- *Colamenti*: fenomeni franosi caratterizzati da un movimento continuo lungo tutto il versante. La velocità di colamento è condizionata dal tipo di materiale coinvolto, dalla pressione dell'acqua interstiziale e dalle dimensioni della massa coinvolta nella frana. Esistono diverse tipologie di colamenti, a seconda della tipologia di materiale interessato:
  - *colate in roccia* (bedrock flows): si tratta di deformazioni spazialmente continue, superficiali o profonde, di una matrice rocciosa in seguito a fenomeni di creep, termine che sta ad indicare deformazioni viscose che si verificano nel tempo sotto uno stato tensionale efficace costante. Tali deformazioni sono molto lente e possono provocare rigonfiamenti o piegamenti.
  - *colate di detriti o terreni sciolti* (debris flows)(fig.1.6): fenomeni di movimento nel quale la massa franata assume caratteristiche simili ad un fluido ad alta viscosità. In questo caso, le superfici di scorrimento sono ben distinguibili e le cause di innesco del moto sono principalmente l'alterazione del regime di pressioni neutre all'interno del terreno, causato da eventi piovosi di eccezionale durata o intensità; alterazione che provoca un decadimento della resistenza a taglio del terreno con la formazione di una superficie di crisi. La velocità delle colate di detriti varia notevolmente in base a numerosi fattori, quali le caratteristiche geometriche e granulometriche del versante di frana, il contenuto d'acqua, la presenza di ostacoli naturali; ed in base ad essa si distinguono colate lente e colate rapide.



## 1.4 Le colate rapide

Le colate rapide sono fenomeni altamente distruttivi che possono avere sede in molteplici contesti geo - ambientali ad opera di fattori di innesco quali pioggia, sisma, e azioni antropiche (Cascini et al., 2005).

In Italia, le colate rapide si verificano generalmente in corrispondenza di pendii montani caratterizzati da un assetto stratigrafico costituito da strati piroclastici o comunque detritici di diverso spessore, giacenti su un substrato roccioso. Le cause di innesco principali sono senz'altro legate a fattori climatici ed antropici: infatti eventi di pioggia di eccezionale intensità o durata hanno spesso provocato fenomeni franosi, mentre l'azione antropica, tramite tagli stradali e rimodellamento dei pendii, ha apportato un peggioramento delle condizioni di stabilità dei versanti stessi. In particolare le attività edilizie ed infrastrutturali, hanno provocato una sistematica deforestazione di intere aree a rischio, privando i terreni di due fattori stabilizzanti: le radici, che esercitano un'azione di rinforzo meccanico nel sottosuolo e la vegetazione, che attraverso il fenomeno dell'evapotraspirazione e attraverso l'intercettazione delle foglie impedisce ad una parte di pioggia di infiltrarsi. Infatti l'infiltrazione provoca un incremento del grado di saturazione dei terreni, un incremento delle pressioni neutre e conseguente riduzione della resistenza a taglio.

In genere la frana inizia con un piccolo smottamento ad alta quota, in corrispondenza di punti deboli (testate di valloni, strade, etc), i terreni spesso saturi d'acqua si mobilitano e "scorrono" a valle con notevole energia e con elevatissima capacità erosiva. La massa in movimento è costituita, quindi, da una miscela di aria, acqua e sedimenti di dimensioni molto variabili e, da un punto di vista cinematico, essa assume caratteri paragonabili a quelli di un fluido molto viscoso, con caratteristiche intermedie tra una corrente liquida con trasporto di carico solido, e una frana. La distanza di propagazione dipende dall'energia cinetica posseduta dalla massa in movimento, dalla morfologia del versante, e dalla presenza o meno di ostacoli naturali in grado di dissipare la suddetta energia.

Le colate sono caratterizzate da velocità di propagazione verso valle molto elevate che variano dai 0,5 ai 20 m/s e da una capacità erosiva molto intensa, in grado di inglobare a sé enormi volumi di materiale dalle dimensioni più disparate: la dimensione granulometrica dei materiali che vengono interessati dai movimenti in esame va dai blocchi plurimetrici alle argille (figura 1.8). All'interno di una colata in movimento la frazione granulometrica maggiore si dispone sul fronte di avanzamento, mentre le frazioni più fini si concentrano sulla coda ed è proprio per questa caratteristica che le colate hanno una potenza erosiva tanto elevata, in grado di distruggere interi manufatti, tronchi d'albero o blocchi lapidei di notevoli dimensioni.

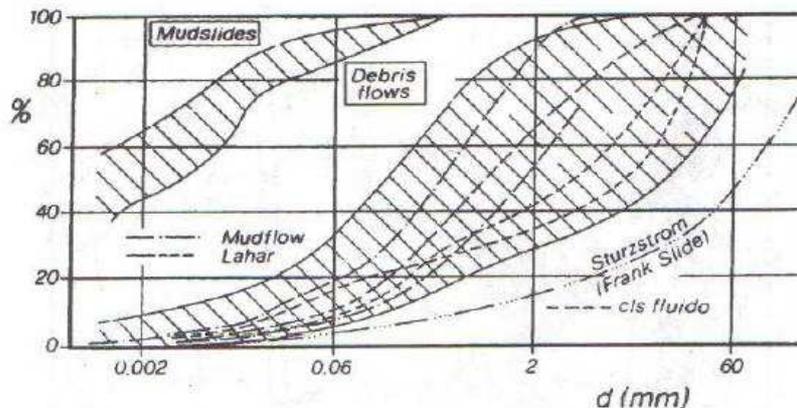


Fig. 1.8: Composizione granulometrica delle colate

Le colate rapide di detrito e di fango sono distinte sulla base della *granulometria* del materiale interessato. Nello specifico, un fenomeno può essere un *debris flow* se la percentuale maggiore di 2 mm è compresa tra il 20 e l'80%, oppure un *mud flow* se la percentuale inferiore a 2 mm è maggiore dell'80% (Scotto di Santolo, 2002).

#### 1.4.1 Evoluzione

L'evoluzione di una colata rapida si può distinguere in più fasi successive:

Fase 1. Rottura localizzata. Il fenomeno inizia con un movimento franoso in corrispondenza di strati più o meno superficiali della coltre detritica, influenzato dalla presenza di fessure o discontinuità o da variazioni di pressione neutre. Il processo di rottura determina la dilatazione del materiale, che a sua volta richiama acqua con una velocità che è funzione della permeabilità dei materiali coinvolti.

Fase 2. Eventuale fluidificazione della massa. La liquefazione di un terreno è possibile solo se questo ha un contenuto d'acqua elevato, pari o prossimo a quello di saturazione ed, inoltre, se esso ha una struttura collassabile. In mancanza di una di queste due possibilità la liquefazione del terreno non può avvenire e quindi l'evoluzione del fenomeno è per colata "secca".

Fase 3. Amplificazione del fenomeno. A questo punto il materiale fluidificato comincia a colare lungo il versante. La massa in movimento accelera, in funzione della pendenza, incorporando lungo il percorso altro materiale detritico e vegetale, anche di notevoli dimensioni, aumentando così la concentrazione volumetrica della frana. In genere il movimento non è unico, ma caratterizzato da diverse ondate successive di materiale che si possono sovrapporre o meno, a seconda dell'energia del flusso. In questa fase la frana può acquisire un potere distruttivo enorme.

Fase 4. Arresto. In corrispondenza di una significativa riduzione della pendenza del versante, diminuisce la velocità ed inizia così la fase di deposizione, con la creazione di una zona di accumulo, di norma a forma di ventaglio o di lobo terminale.

#### ***1.4.2 Fattori predisponenti ed innescanti delle colate rapide***

I fattori che intercorrono allo sviluppo di colate rapide sono numerosi e di diversa natura e spesso interagiscono fra loro. In generale il movimento è influenzato da aspetti geologici, topografici, climatici e antropici.

In particolare le cause si dividono in:

- *Fattori predisponenti*: fattori intrinseci di instabilità propri di ciascun versante e legati, essenzialmente, alle caratteristiche morfologiche, strutturali, granulometriche e meccaniche dei terreni costituenti il pendio (natura dei terreni, caratteristiche geometriche di eventuali piani di discontinuità, orientazione del pendio).

- *Fattori innescanti*: interagiscono con i fattori predisponenti ed innescano l'inizio del movimento franoso. Il fattore scatenante principale è la precipitazione meteorica.

#### ***1.4.3 Colate di fango nella regione Campania: contesti geologici***

In virtù dell'elevatissimo potere distruttivo che le contraddistingue, le colate di fango e detriti sono state la causa di recenti drammatiche calamità avvenute sul territorio campano, in particolare si ricordano quelle verificatesi durante gli eventi alluvionali che hanno devastato gli abitati di Sarno e Quindici nel maggio 1998, di Cervinara nel dicembre 1999, e nel comune di Ischia nell'aprile 2006. La causa principale del gran numero di eventi di questo tipo avvenuti nella regione Campania, è da attribuirsi alla conformazione geomorfologica di numerosi pendii prossimi ai centri eruttivi dei Campi Flegrei e del Somma- Vesuvio. Queste aree, infatti, sono caratterizzate da una stratigrafia caratterizzata da un substrato roccioso calcareo o tufaceo, sul quale, a causa delle numerosissime eruzioni vulcaniche succedutesi nel Pleistocene e nell'Olocene, è andato a depositarsi una coltre di terreni piroclastici di granulometria diversificata (Fig. 1.9). Questa stratificazione, generalmente parallela al versante, condiziona la circolazione idrica e fa sì che strati profondi relativamente impermeabili, in concomitanza con le piogge, facilitino l'instaurarsi di falde sospese che generano pressioni neutre positive, con conseguente riduzione delle resistenze meccaniche. È proprio questa caratteristica a conferire ai versanti campani le condizioni di instabilità.

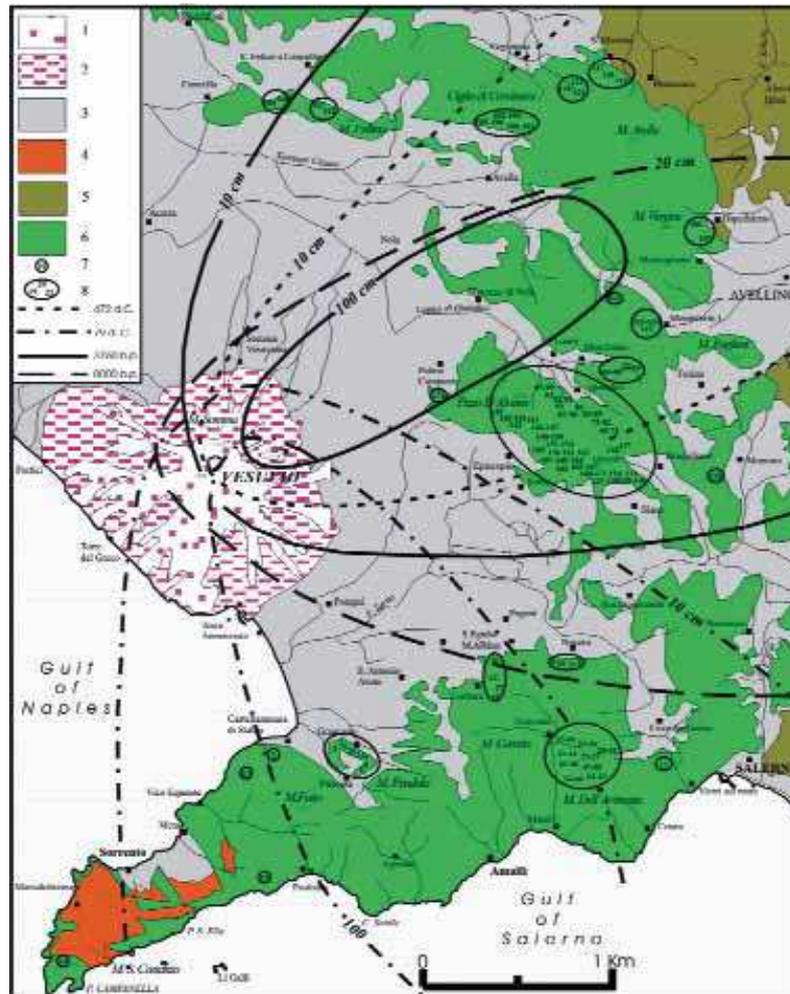


Fig 1.9 Carta geologica e distribuzione dei principali depositi da caduta del Somma-Vesuvio (Di Crescenzo e Santo, 2005): 1) lave e 2) depositi piroclastici prossimali del distretto del Somma-Vesuvio; 3) depositi piroclastici ed alluvionali; 4) flysch miocenici della Penisola Sorrentina; 5) depositi terrigeni mio-pliocenici; 6) calcari e dolomie mesozoici; 7) ubicazione di frana da colata rapida (singola); 8) gruppo di frane.

## **2. CAPITOLO**

### **Monitoraggio, analisi e previsione delle colate di fango**

#### **2.1 Introduzione**

Nell'ultimo cinquantennio numerosi fenomeni franosi del tipo colata si sono verificati causando danni catastrofici. La ragione di questo incremento di calamità è da ricercarsi in due fattori fondamentali :

- lento ma inesorabile mutamento delle condizioni climatiche, che vede un incremento di fenomeni meteorologici di particolare intensità ma di breve durata, portando i versanti a rischio frane ad incrementi di pressioni neutre repentini;
- crescita esponenziale dei beni esposti agli eventi franosi, verificatosi in particolar modo dopo la seconda guerra mondiale.

In particolare, il primo fattore ha determinato un incremento della pericolosità, mentre il secondo, un incremento del valore esposto, contribuendo entrambi ad un aumento del rischio.

Oggi, quindi, si può senz'altro affermare che qualsiasi evento franoso tipo colata ha un potenziale di danno molto più elevato rispetto al passato e questo ha comportato un impiego elevatissimo di risorse umane ed economiche, atte a studiare i meccanismi di innesco e, parallelamente, efficaci criteri di mitigazione del rischio.

#### **2.2 Monitoraggio**

Il monitoraggio costituisce uno strumento fondamentale per la conoscenza e lo studio delle grandezze protagoniste dei fenomeni in atto, e la conseguente valutazione sulle condizioni di sicurezza di un versante. Infatti porta un utile contributo di conoscenze nelle varie fasi di gestione di un pendio: dalla valutazione del rischio di frana all'assunzione di decisioni sull'uso del pendio e sull'eventuale stabilizzazione. In generale si possono individuare due finalità del monitoraggio:

- raccogliere dati necessari per condurre analisi di stabilità del pendio;
- monitorare le grandezze significative del livello di sicurezza del versante per eventuali limitazioni dell'uso del suolo o per provvedimenti di emergenza. In questo caso il monitoraggio deve essere affidabile e continuo nel tempo.

Se ci si riferisce al territorio italiano, ed in particolar modo a quello campano, ovvero a pendii costituiti da ceneri e pomici vulcaniche parzialmente sature poggianti su substrati rocciosi, le grandezze da monitorare sono: la suzione<sup>1</sup> e il contenuto d'acqua nel sottosuolo, le piogge, la temperatura e altri fattori climatici.

### 2.2.1 Strumenti e tecniche di misura

A supporto della fase di monitoraggio, sono disponibili una serie di strumenti all'avanguardia atti a misurare le grandezze suddette; in particolare, nel caso di terreni parzialmente saturi, avremo:

- *Tensiometri*: strumenti costituiti da un tubo di plastica riempito di acqua, con una piastra in ceramica all'estremità inferiore, attraverso la quale il tubo cede acqua al terreno circostante fino al raggiungimento della condizione di equilibrio (Fig. 2.1a). I tensiometri necessitano di accurata manutenzione periodica;
- *Sonde TDR*: sonde formate da aghi metallici collegati ad un generatore di impulsi elettrici. La prova si effettua inserendo gli aghi nel terreno e, attraverso la misura della costante dielettrica di quest'ultimo, si risale al contenuto d'acqua (Fig. 2.1b);
- *Stazione meteorologica*: strumento di misura dei parametri climatici nell'area a rischio instabilità, che consente eventuali correlazioni tra eventi piovosi e escursioni di falda (Fig. 2.1 c).



fig. 2.1 Strumentazione comunemente utilizzata nel monitoraggio di pendii di terreni parzialmente saturi  
a) tensiometri, b) sonde TDR, c) stazione meteorologica.

<sup>1</sup> La suzione è definita come la differenza tra la pressione atmosferica e la pressione dell'acqua presente nei pori:  $u_a - u_w$ . Essa dipende essenzialmente dalla granulometria e dal grado di saturazione dei terreni e conferisce ad esso caratteristiche meccaniche anche molto differenti rispetto a quelle in condizione di completa saturazione, in particolare una minore permeabilità e maggiori rigidità e resistenza a taglio. Quest'ultima può essere descritta tramite una estensione del criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, secondo l'espressione (Fredlund e Rahrdjo, 1993):  $\tau = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b] + (\sigma - u_a) \tan \phi'$ , in cui:  $c'$  è la coesione;  $\phi'$  è l'angolo di attrito efficace,  $\sigma$  è la tensione normale totale e  $(u_a - u_w) \tan \phi_b$  è il contributo legato alla suzione denominato coesione apparente. Tale contributo giustifica la stabilità dei depositi sciolti poggianti su pendii molto ripidi caratterizzati da pendenze molto maggiori dell'angolo di attrito.

## 2.3 Analisi

Per la corretta interpretazione delle misure raccolte per la comprensione dei meccanismi di innesco delle colate di fango è fondamentale analizzare le condizioni idrauliche al contorno, ovvero quelle riguardanti il piano campagna e la base del volume di materiale ritenuto instabile.

Le interazioni idrauliche con il piano campagna, sono regolate da un complesso fenomeno di scambio di materia tra l'acqua del sottosuolo e quella atmosferica, che si può schematizzare con l'infiltrazione nei giorni di pioggia e con l'evapotraspirazione nei giorni asciutti e soleggiati. Il flusso di acqua entrante è discontinuo ed allo stato liquido ed è regolato dall'intensità e dalla durata degli eventi meteorici; il flusso uscente, invece, è pressoché continuo nel tempo, sottoforma di vapore generato dai processi di evapotraspirazione regolati da numerosi fattori, quali il contenuto d'acqua, la temperatura e la vegetazione. Proprio a causa di tutte queste variabili, la condizione al contorno sul piano campagna è la più complessa ed allo stesso tempo cruciale per lo studio che si vuole intraprendere.

Pertanto:

- *il contenuto d'acqua* del terreno è il parametro fondamentale da dover analizzare, in quanto regola gli scambi di materia con l'esterno. Esso è strettamente legato agli eventi meteorici agenti sul volume di terreno considerato ed è dipendente non solo dall'intensità di pioggia in un periodo di breve durata, ma anche dall'afflusso di pioggia cumulata in un lungo periodo antecedente l'evento franoso.
- *la temperatura* gioca un ruolo di fondamentale importanza sulla risposta del terreno, per cui medesimi eventi meteorici possono dar luogo ad effetti diversi a seconda della stagione. Sfortunatamente la temperatura è un parametro difficile da misurare, poiché distribuita in modo non uniforme e non stazionario nello strato superficiale di spessore inferiore al metro.
- *la vegetazione* regola la traspirazione e l'evaporazione ed il flusso di acqua sottratta al terreno è direttamente proporzionale all'entità della copertura fogliare, nonché alla profondità e alla densità delle radici. La vegetazione, come già richiamato nel capitolo precedente, esercita una doppia azione benefica, nei confronti dell'instabilità dei pendii: essa infatti da un lato incrementa notevolmente la traspirazione, sottraendo un'ingente aliquota d'acqua al terreno, e dall'altro effettua un'azione di sostegno meccanico attraverso le radici degli alberi. In particolare, quest'ultima proprietà è significativa nel primo metro di terreno e, da un punto di vista meccanico, consiste in un allungamento delle radici a causa delle deformazioni di taglio, con la successiva nascita di tensioni di trazione che sono dirette

nel verso delle forze resistenti. Si può addirittura stimare il contributo di resistenza delle radici in funzione della profondità e del tipo di pianta, come illustrato nella figura 2.2 (Belfiore ed Urciuoli).

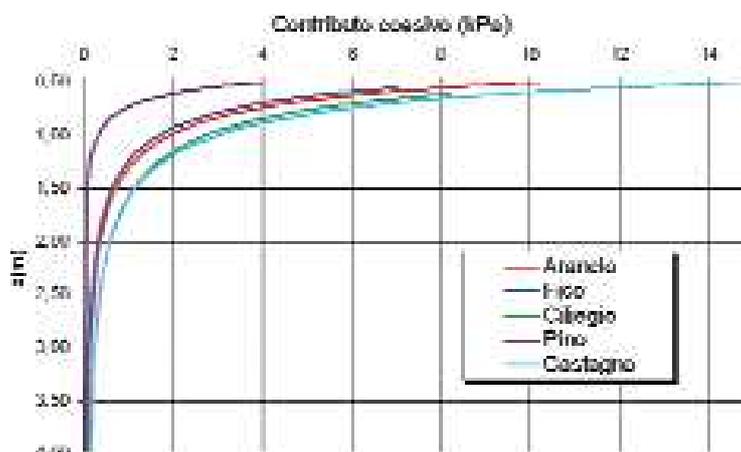


fig.2.2: Contributo di resistenza delle radici, schematizzato come aliquota di coesione

Se si considerano invece le condizioni idrauliche rispetto alla base inferiore, esse saranno determinate dal tipo di roccia su cui poggia il manto detritico considerato; in particolare, se si considera un substrato costituito da roccia lapidea, sarà il grado di fessurazione di quest'ultimo a determinare se il contorno inferiore è drenante o meno. Se siamo in presenza di calcari ad elevata fatturazione, avremo un contorno inferiore drenante; al contrario, in assenza di una significativa fatturazione, il contorno inferiore è da considerarsi pressoché impermeabile.

## 2.4 Previsione

Accanto ad una fase di analisi e monitoraggio, è indispensabile un'azione di previsione dell'evento franoso che possa, nella migliore delle ipotesi, portare alla salvaguardia della popolazione e dei beni di valore, nonché portare allo sviluppo di piani di emergenza che regolino le fasi successive alla catastrofe.

I suddetti piani d'emergenza devono contenere: metodologie dei sistemi di preannuncio, definizione delle soglie alle quali far scattare l'allarme e i provvedimenti, la circoscrizione delle aree di emergenza e, infine, le vie di esodo preventivamente progettate.

Per quanto riguarda le colate rapide, purtroppo, non vi sono significativi segni premonitori, quali spostamenti, da tenere in considerazione, per cui il livello di allarme è definito in base a valori di soglia delle piogge, tipici di un determinato territorio. In particolar modo, si stabiliscono soglie di pioggia basate sull'osservazione di un elevato numero di casi precedenti nei quali si sono verificati eventi di frana o meno. Il raggiungimento di una soglia, però, non è di per sé una condizione sufficiente a far scattare lo stato di allerta.

I criteri adottati generalmente per la predizione sono per lo più empirici e cioè basati sull'analisi statistica degli eventi meteorologici che hanno condotto a movimenti franosi in un determinato contesto geomorfologico. All'interno di tali approcci empirici le variabili analizzate sono essenzialmente le seguenti:

- *Intensità pioggia critica*: rappresenta l'intensità, espressa generalmente in mm/h, delle precipitazioni che precedono nell'immediato un evento franoso; in particolare si fa riferimento all'intervallo di tempo che va dall'istante in cui si registra un improvviso incremento di precipitazioni a quello in cui si ha il fenomeno del distacco di un versante;
- *Pioggia cumulata*: considera le precipitazioni di un periodo antecedente l'evento franoso, di lunga durata (da diversi giorni ad alcuni mesi).

Legando i suddetti parametri in relazioni analitiche empiriche, cioè senza basi fisiche, si ottengono i valori di intensità e durata della precipitazione in corrispondenza dei quali possono verificarsi eventi di frana. Si vanno a costruire, cioè, le cosiddette soglie pluviometriche, definite come curve, che rappresentano il contorno inferiore delle coppie di punti in concomitanza dei quali si è verificato un fenomeno di dissesto.

In letteratura esistono numerosissime soglie di questo tipo, anche molto discordanti tra loro; il limite principale di un approccio del genere, infatti, sta nel fatto di aver analizzato solo i parametri di intensità e durata, tralasciando completamente numerosissimi fattori che giocano un ruolo fondamentale nei riguardi di un evento franoso: la distribuzione di pressioni neutre nel sottosuolo, il contenuto d'acqua dei terreni, la loro stratigrafia e morfologia, la temperatura e altri fattori climatici quali velocità e direzione dei venti, radiazione solare etc.

In conclusione si può certamente affermare che, laddove sia temuto un innesco di fenomeni franosi, bisogna intraprendere una serie di studi atti sinteticamente a: monitorare, analizzare ed infine prevedere un evento di frana.

## **CAPITOLO 3**

### **Soglie previsionali per l'innescio di frane meteo-indotte**

#### **3.1 Premessa**

Nonostante le frane siano fenomeni che da sempre hanno caratterizzato la storia evolutiva del nostro pianeta, è stato soprattutto nell'ultimo cinquantennio che tali eventi hanno provocato un ingente numero di danni a livello di vite umane e beni materiali. La causa principale di queste catastrofi è dovuta essenzialmente all'incremento smisurato dei beni esposti: il costante aumento della popolazione unito a leggi di mercato e, soprattutto in Italia, a speculazioni edilizie, hanno comportato dapprima una deforestazione e successivamente un'infrastrutturazione di intere aree ad elevato rischio idrogeologico. Numerose analisi, al giorno d'oggi, affermano che la frequenza temporale di eventi catastrofici sia maggiore del periodo necessario per riparare i danni di fenomeni precedenti. Dunque si preferisce indirizzare ingenti risorse umane ed economiche verso progetti che mirano a prevedere in maniera sufficientemente affidabile futuri eventi franosi, piuttosto che investire per modificare le caratteristiche meccaniche degli edifici già esistenti.

In quest'ottica, le soglie previsionali per l'innescio di frane meteo indotte rivestono un ruolo fondamentale per la mitigazione del rischio idrogeologico.

#### **3.2 Definizione di soglia**

Una soglia è un valore minimo o massimo di un determinato parametro o quantità, necessario affinché si inneschi un certo fenomeno o, diversamente, vi possa essere un mutamento da una condizione iniziale ad un'altra. Con il termine "meteo indotte", invece, ci si vuole riferire a tutte quelle soglie correlate ad eventi franosi causati da precipitazioni meteorologiche, non prendendo in esame, di conseguenza, cause tettoniche o antropiche.

In definitiva una soglia meteo indotta rappresenta un determinato valore di precipitazione, umidità del suolo o qualunque altro parametro idrologico, che, se raggiunto o superato, può provocare un innescio di frana.

### **3.3 Tipologie di soglie**

La determinazione di una soglia meteo indotta è estremamente complessa, poiché dipende da numerose variabili tra loro interagenti, quali: caratteristiche litologiche, geomorfologiche e idrologiche dei vari strati che formano il suolo, temperatura e umidità dell'aria, direzione e intensità dei venti, vegetazione. Molti di questi parametri, inoltre, sono variabili nello spazio e nel tempo, per cui è praticamente impossibile ricavare una funzione che tenga conto di tutte le interazioni tra di essi.

Per tale motivo ci si può approcciare al problema in due metodologie principali :

- Metodo empirico: mira alla determinazione di soglie attraverso lo studio, su base statistica, degli eventi passati e alle condizioni meteorologiche che li hanno scatenati. Tale metodo è privo di qualunque base fisica;
- Metodo fisicamente basato: definisce valori limite di pioggia che provocano l'insorgere di una frana, a seguito dello studio di tutti i fattori che determinano il fenomeno, definendoli nello spazio e nel tempo.

#### **3.3.1 Soglie derivanti da modelli fisicamente basati**

Le soglie derivanti da modelli su base fisica sono estremamente complesse da determinare poiché, come già accennato, richiedono conoscenze dettagliate su tutte le variabili in gioco e sulle loro interazioni; per determinare una soglia pluviometrica di questo tipo, infatti, bisogna innanzitutto provvedere ad accurate indagini del sottosuolo, per determinare i valori di umidità e suzione, permeabilità e caratteristiche geomorfologiche dei volumi di terreno interessati a possibili smottamenti. Successivamente bisogna provvedere alle misure delle variabili meteorologiche, quali intensità e durata di pioggia, temperatura, intensità dei venti.

Prescindendo dal fattore economico che incide sulla determinazione di tutti questi parametri, bisogna comunque considerare la grande variabilità che questi hanno sia nello spazio sia nel tempo: basti pensare alla permeabilità del suolo che, per esempio, è fortemente condizionata dall'ampiezza e dalla direzione delle fratture della roccia o all'evapotraspirazione dipendente in grandissima parte dal tipo e dalla densità di vegetazione sullo strato superficiale oltre che dall'umidità dell'aria e dalla temperatura. Nella maggior parte dei casi, comunque, tutte le informazioni necessarie per la formulazione di un modello fisicamente basato non sono disponibili e questo limita fortemente la diffusione di soglie di questo tipo.

### 3.3.2. Soglie derivanti da modelli empirici

Allo stato di conoscenze attuale il più diffuso ed efficace approccio applicabile su vaste aree, è quello empirico – statistico, basato sugli accadimenti delle frane avvenute in passato e finalizzato a stimare non più il singolo movimento ma la possibilità che in un intervallo di tempo, per una determinata condizione meteorologica, si possano verificare delle frane.

Le principali variabili su cui si basa lo studio dei modelli empirici sono:

- ✓ Intensità di pioggia: ammontare di precipitazioni cadute in un intervallo di tempo unitario. Si misura generalmente in mm/h;
- ✓ Piogge antecedenti: ammontare di precipitazioni durante un periodo precedente variabile l'evento franoso;
- ✓ Pioggia cumulata totale: ammontare di precipitazioni cadute in un intervallo di tempo variabile (da diversi giorni a diversi mesi);
- ✓ Durata della pioggia generalmente espressa in ore.

Le soglie esistenti sono definite in base ad una combinazione dei parametri precedentemente introdotti (Fig. 3.1):

- ✓ Intensità di pioggia critica: ammontare di precipitazioni immediatamente precedenti l'evento franoso in corrispondenza dell'intervallo di tempo che va dal momento in cui si è registrato un improvviso incremento di intensità di pioggia, fino a quello in cui si è avuto l'innescio di frana;
- ✓ Durata di pioggia critica;
- ✓ Durata e intensità di pioggia normalizzate: rapporto tra durata/intensità di pioggia che provoca un evento franoso e la media annuale di precipitazioni (MAP).

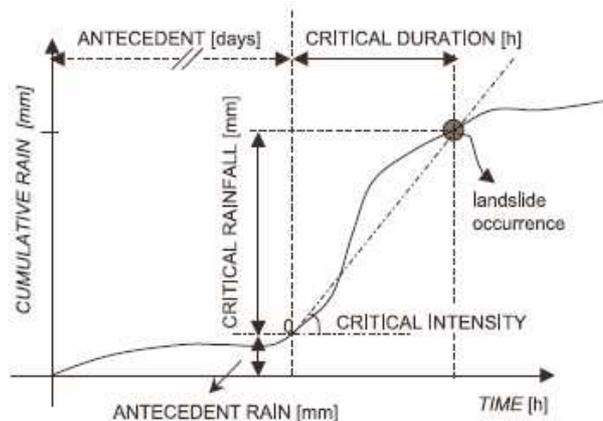


Fig 3.1 principali parametri usati nella definizione di soglie pluviometriche (Aleotti 2004)

Di seguito sono riportati tutti i parametri con i relativi studiosi che per primi li hanno considerati (tab. 1).

**tabella 3.1. Variabili usate in letteratura per la definizione di soglie pluviometriche per l'innescio di frane, con le unità di misura utilizzate e i primi studiosi ad averle utilizzate.**

<i>VARIABLE</i>	<i>DESCRIPTION</i>	<i>UNITS</i>	<i>FIRST INTRODUCED</i>
D	Rainfall duration. The duration of the rainfall event or rainfall period.	h, or days	Caine (1980)
D <sub>C</sub>	Duration of the critical rainfall event.	h	Aleotti (2004)
E <sub>(h),(d)</sub>	Cumulative event rainfall. The total rainfall measured from the beginning of the rainfall event to the time of failure. Also known as storm rainfall. "h" indicates the considered period in hours; "d" indicates the considered period in days.	mm	Innes (1983)
E <sub>MAP</sub>	Normalized cumulative event rainfall. Cumulative event rainfall divided by MAP ( $E_{MAP}=E/MAP$ ). Also known as normalized storm rainfall.	-	Guidicini and Iwasa (1977)
C	Critical rainfall. The total amount of rainfall from the time of a distinct increase in rainfall intensity ( $t_0$ ) to the time of the triggering of the first landslide ( $t_f$ ).	mm	Govi and Sorzana (1980)
C <sub>MAP</sub>	Normalized critical rainfall. Critical rainfall divided by MAP ( $C_{MAP}=C/MAP$ ).	-	Govi and Sorzana (1980)
R	Daily rainfall. The total amount of rainfall for the day of the landslide event.	mm	Crozier and Eyles (1980)
R <sub>MAP</sub>	Normalized daily rainfall. Daily rainfall divided by MAP ( $R_{MAP}=R/MAP$ ).	mm	Terlien (1998)
I	Rainfall intensity. The amount of precipitation in a period, i.e., the rate of precipitation over the considered period. Depending on the duration of the measuring period, rainfall intensity measures peak or average precipitation rates.	mm/h	Caine (1980)
I <sub>MAP</sub>	Normalized rainfall intensity. Rainfall intensity divided by MAP ( $I_{MAP}=I/MAP$ ).	1/h	Cannon (1988)
I <sub>max</sub>	Maximum hourly rainfall intensity. The maximum hourly rainfall intensity.	mm/h	Onodera et al. (1974)
I <sub>p</sub>	Peak rainfall intensity. The highest rainfall intensity (rainfall rate) during a rainfall event. Available from detailed rainfall records.	mm/h	Wilson et al. (1992)
İ <sub>(h)</sub>	Mean rainfall intensity for final storm period. "h" indicates the considered period, in hours, most commonly from 3 to 24 hours.	mm/h	Govi and Sorzana (1980)
I <sub>C</sub>	Critical hourly rainfall intensity.	mm/h	Heyerdahl et al. (2003)
I <sub>f</sub>	Rainfall intensity at the time of the slope failure. Available from detailed rainfall records.	mm/h	Aleotti (2004)
I <sub>fMAP</sub>	Normalized rainfall intensity at the time of the slope failure. Rainfall intensity at the time of the slope failure divided by MAP ( $I_{fMAP}=I_f/MAP$ ).	1/h	Aleotti (2004)
A <sub>(d)</sub>	Antecedent rainfall. The total (cumulative) precipitation measured before the landslide triggering rainfall event. "d" indicates the considered period in days.	mm	Govi and Sorzana (1980)
A <sub>MAP</sub>	Normalized antecedent rainfall. Antecedent rainfall divided by MAP ( $A_{MAP}=A/MAP$ ).	-	Aleotti (2004)
A <sub>(y)</sub>	Antecedent yearly precipitation up to date of the event. The total (cumulative) yearly precipitation measured before the landslide triggering rainfall event.	mm	Guidicini and Iwasa (1977)
A <sub>(y)MAP</sub>	Normalized antecedent yearly precipitation up to date of the event. Antecedent yearly precipitation divided by MAP ( $A_{(y)MAP}=A_{(y)}/MAP$ ).	-	Guidicini and Iwasa (1977)
F <sub>C</sub>	Sum of normalized antecedent yearly precipitation and normalized event rainfall ( $F_C=A_{(y)MAP}+E_{MAP}$ ). Also known as "final coefficient".	-	Guidicini and Iwasa (1977)
MAP	Mean annual precipitation. For a rain gauge, the long term yearly average precipitation, obtained from historical rainfall records. A proxy for local climatic conditions.	mm	Guidicini and Iwasa (1977)
RDS	Average number of rainy-days in a year. For a rain gauge, the long term yearly average of rainy (or wet) days, obtained from historical rainfall records. A proxy for local climatic conditions.	#	Wilson and Jayko (1997)
RDN	Rainy-day normal. For a rain gauge, the ratio between the MAP and the average number of rainy-days in a year ( $RDN=MAP/RDS$ ).	mm/#	Wilson and Jayko (1997)
N	Ratio between the MAP of two different (distant) areas.	-	Barbero et al. (2004)

Data la grande numerosità di soglie empiriche esistenti in letteratura, si è operata una classificazione che le suddivide in base a due criteri fondamentali: l'estensione dell'area di validità e la scelta degli eventi meteorici presi in riferimento.

Pertanto le soglie empiriche possono suddividersi in tre categorie in funzione dell'estensione dell'area a cui si riferiscono:

- Soglie globali (global empirical thresholds) se ci si riferisce a soglie costruite per indicare un livello minimo di precipitazioni sotto il quale è molto improbabile avere eventi franosi. Esse vogliono avere una validità generale, a prescindere dalle condizioni meteorologiche locali;
- Soglie regionali (regional thresholds) quando si riferiscono ad aree caratterizzate da condizioni meteorologiche, climatiche e geomorfologiche simili e che si estendono al massimo per diverse migliaia di chilometri quadrati;
- Soglie locali (local thresholds) basate sullo studio di specifici assetti geofisici e climatici e considerate valide per il solo territorio di riferimento.

Se un aspetto negativo delle soglie globali è quello di non prendere in considerazione le variabilità climatiche e geomorfologiche tipiche delle diverse aree del pianeta, le soglie regionali e locali hanno la limitazione di essere valide unicamente per il territorio a cui fanno riferimento con la conseguente impossibilità di essere esportate alle regioni circostanti o ad aree con condizioni simili (Crosta 1989).

Una seconda suddivisione prevede, invece, l'esistenza di due grandi categorie di soglie pluviometriche, basata, essenzialmente, su di una diversa ampiezza temporale nel quale prendere in considerazione tutti i fattori pluviometrici che influenzano il processo di innesco di frana. In particolare avremo:

- Soglie derivanti da parametri riferiti al singolo evento meteorico critico;
- Soglie che considerano i parametri correlati a tutti gli eventi meteorici critici antecedenti.

### 3.4 Soglie empiriche in termini di intensità – durata, ID

Le soglie empiriche di questo tipo sono costruite prendendo in esame eventi/o meteorici/o che hanno provocato un innesco di frana. La formulazione di una soglia pluviometrica di tipo empirico prevede la costruzione di una curva in un piano cartesiano, semilogaritmico o logaritmico, disegnata senza rigorosi criteri matematici, fisici o statistici. Le soglie derivanti da misure di un singolo o comunque un ristretto numero di eventi meteorici che hanno provocato eventi franosi, possono essere ulteriormente suddivise in base ai parametri presi in considerazione per la loro formulazione; la grande maggioranza di esse sono formulate in termini di durata ed intensità di pioggia, le cosiddette soglie ID (intensity – duration thresholds).

Le soglie ID esistenti in letteratura sono numerosissime (tab. 3.2) eppure tutte costruite sulla stessa formula analitica introdotta da *Caine* nel 1980:

$$I = c + \alpha * D^{\beta}$$

Dove:

I = intensità di pioggia

D = durata di pioggia

$c > 0$  ,  $\alpha$  ,  $\beta$  = parametri

La maggior parte delle soglie si riferiscono ad una durata che va da 1h alle 100h e di intensità tra 1 a 200mm/h; per quanto riguarda i parametri, invece, la maggior parte di esse considerano  $c = 0$  e  $\beta$  negativo, mentre  $\alpha$  compreso nell'intervallo tra [4, 00; 176,40] (Fig.3.2).

Dall' analisi di figura 3.2 si osserva che:

- con un incremento della durata di precipitazioni, il valore minimo di intensità che può scatenare una frana decresce (e quest'andamento risulta quasi sempre lineare in un piano logaritmico);
- ad eccezione della soglia proposta da Caine (num 1) , si può affermare che le soglie globali si posizionano nella parte inferiore del grafico rispettando, del resto, la loro stessa definizione di limiti inferiori sotto i quali l'accadimento di innesco di frana ha scarsissime probabilità di verificarsi.

tabella 3.2. Principali Soglie Intensità – Durata esistenti in letteratura.

<i>ID</i>	<i>AUTHOR</i>	<i>ZONE</i>	<i>EXTENT</i>	<i>TYPE OF LANDSLIDE</i>	<i>EQUATION</i>
1	Caine (1980)	World	Global	All	$I = 14.82 \cdot D^{-0.39}$ $0.167 \text{ hr} < D < 500 \text{ hr}$
2	Innes (1983)	World	Global	Debris flows	$I = 4.93 \cdot D^{-0.49}$ $0.1 \text{ hr} < D < 100 \text{ hr}$
3	Moser and Hohensinn (1983)	Upper Carinthia and Eastern Tyrol	Regional	Soil slips	$I = 41.66 \cdot D^{-0.77}$ $1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$
4	Cancelli and Nova (1985)	Valtellina, Northern Italy	Local	Soil slips	$I = 44.67 \cdot D^{-0.78}$ $0.1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$
5	Cannon and Ellen (1985)	San Francisco Bay Region, California	Local	Debris flows	$I = 6.9 + 38 \cdot D^{-1}$ $2 \text{ hr} < D < 24 \text{ hr}$
6	Wieczorek (1987)	Central Santa Cruz Mountains, California	Local	Debris flows	$I = 1.7 + 9 \cdot D^{-1}$ $1 \text{ hr} < D < 6.5 \text{ hr}$
7	Guadagno (1991)	Campania Region, Italy	Regional	All	$I = 176.40 \cdot D^{-0.90}$ $0.1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$
8	Rodolfo and Arguden (1991)	Mayon, Philippine	Local	Debris flows	$I = 27.3 \cdot D^{-0.38}$ $0.167 \text{ hr} < D < 3 \text{ hr}$
9	Ceriani et al. (1992)	Lombardy Region, Italy	Regional	All	$I = 20.1 \cdot D^{-0.55}$ $1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$
10	Larsen and Simon (1993)	Puerto Rico	Regional	All	$I = 91.46 \cdot D^{-0.82}$ $2 \text{ hr} < D < 312 \text{ hr}$
11	Arboleda and Martinez (1996)	Pasig-Potrero River, Philippine	Local	Lahars	$I = 9.23 \cdot D^{-0.37}$ $0.08 \text{ hr} < D < 7.92 \text{ hr}$
12	Clarizia et al. (1996)	World	Global	Soil slips	$I = 10 \cdot D^{-0.77}$ $0.1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$
13	Tuñgol and Regalado (1996)	Sacobia River	Local	Lahars	$I = 5.94 \cdot D^{-1.5}$ $0.167 \text{ hr} < D < 3 \text{ hr}$
14	Zimmermann et al. (1997)	Switzerland	Regional	All	$I = 32 \cdot D^{-0.70}$ $1 \text{ hr} < D < 45 \text{ hr}$
15	Corominas and Moya (1999)	Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain	Local	All	$I = 0.19 + 133 \cdot D^{-1}$ $84 \text{ hr} < D < 1092 \text{ hr}$
16	Calcaterra et al. (2000)	Campania Region, Italy	Regional	All	$I = 28.10 \cdot D^{-0.74}$ $1 \text{ hr} < D < 600 \text{ hr}$
17	Crosta and Frattini (2000)	World	Global	Shallow landslides	$I = 0.48 + 7.2 \cdot D^{-1}$ $0.1 \text{ hr} < D < 1000 \text{ hr}$

ID	AUTHOR	ZONE	EXTENT	TYPE OF LANDSLIDE	EQUATION
18	Marchi et al. (2002)	Moscardo Torrent, Northern Italy	Local	All	$I = 15 \cdot D^{-0.70}$ $1 \text{ hr} < D < 30 \text{ hr}$
19	Ahmad (2003)	Eastern Jamaica	Regional	Shallow landslides	$I = 11.5 \cdot D^{-0.26}$ $1 \text{ hr} < D < 150 \text{ hr}$
20	Jakob and Weatherly (2003)	North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia	Regional	Shallow landslides	$I = 4.0 \cdot D^{-0.45}$ $0.1 \text{ hr} < D < 150 \text{ hr}$
21	Aleotti (2004)	Piedmont Region, Italy	Regional	Shallow landslides	$I = 19 \cdot D^{-0.50}$ $4 \text{ hr} < D < 120 \text{ hr}$
22	Floris et al. (2004)	Valangona, Northern Apennines, Italy	Local	All	$I = 68.645 \cdot D^{-0.5929}$ where $I$ is in mm/days and $D$ in days
23	Baum (2005)	Seattle Area	Local	Shallow landslides	$I = 82.73 \cdot D^{-1.13}$ $20 \text{ hr} < D < 55 \text{ hr}$
24	Chen et al. (2005)	Taiwan	Regional	All	$I = 115.47 \cdot D^{-0.80}$ $1 \text{ hr} < D < 400 \text{ hr}$
25	Giannecchini (2005)	Apuan Alps, Italy	Local	All	a: $I = 26.87 \cdot D^{-0.64}$ $0.1 \text{ hr} < D < 35 \text{ hr}$ b: $I = 38.36 \cdot D^{-0.74}$ $D \leq 12 \text{ hr}$

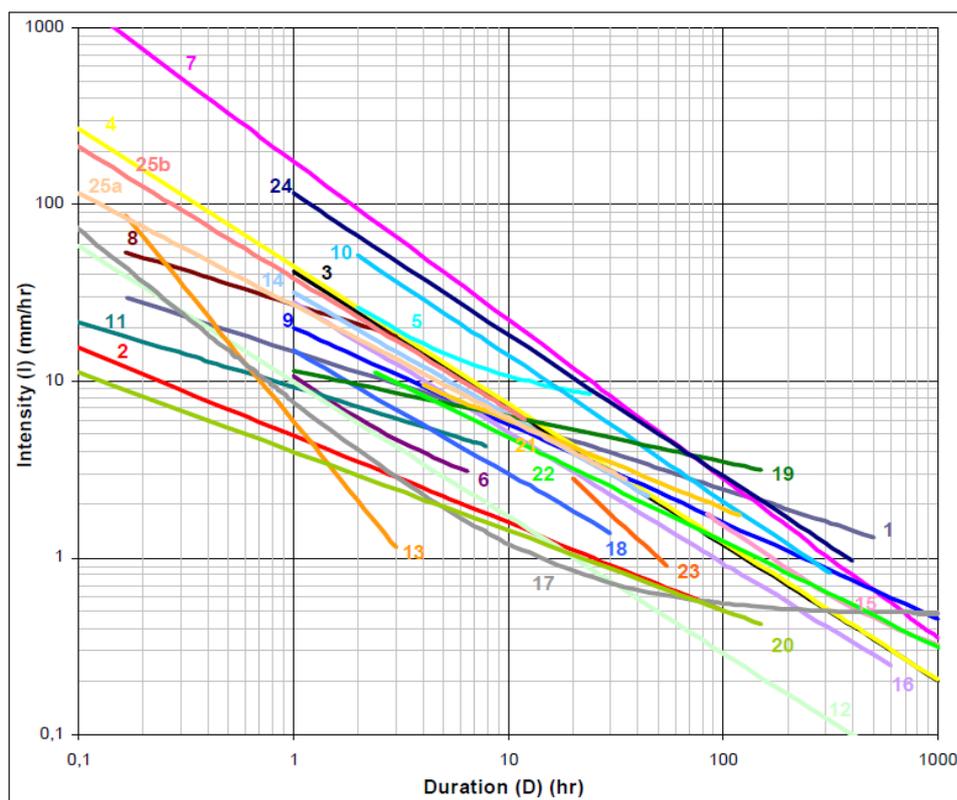


Fig 3.2 Soglie ID riferite alla tabella 3.2

- le soglie locali si posizionano nella parte più alta del grafico (leggermente superiori alle soglie regionali). Esse, inoltre, sono generalmente definite per un range ristretto di durata di pioggia, se comparate alle altre tipologie di soglia;
- vi sono differenze tra soglie costruite per medesime regioni come, ad esempio, quelle formulate da Calcaterra (num 16) e Guadagno ( num 7) per i terreni piroclastici della regione Campania;

Trovare le ragioni specifiche delle suddette differenze è molto complicato ed, anzi, sono proprio tali discordanze tra le numerose soglie empiriche esistenti, a rappresentare il limite maggiore di quest'approccio. Sicuramente le ragioni vanno ricercate nella grande variabilità dei parametri rappresentativi gli eventi meteorici (intensità e durata), ma anche in quelli geologici e geomorfologici delle regioni di riferimento; altro aspetto da considerare, ma di eguale importanza, è legato alla raccolta e alla formulazione dei dati di riferimento: questi sono limitati a periodi di tempo troppo spesso insufficienti e non mancano tra di essi segni di discordanza e incoerenza.

Per cercare di sopperire alle suddette limitazioni e per rendere comparabili diverse soglie costruite per regioni differenti, si è introdotto il concetto di *soglie normalizzate*: la normalizzazione è ottenuta, di solito, dividendo l'intensità di pioggia di uno (o più) evento(i) per la media annuale delle precipitazioni tipica per una determinata regione. In questo modo sono proposte diverse soglie normalizzate (tabella 3.3), costruite, ad eccezione di tre (54, 55, 56), considerando i parametri:  $c = 0$ ;  $\alpha$  compresa nell'intervallo  $[0,02 ; 4,62]$  e  $\beta$  nell'intervallo  $[-0,79 ; -0,21]$ .

**Tab 3.3 Soglie ID normalizzate per l'innesco di frane**

#	EXTENT	AREA	LANDSLIDE TYPE	EQUATION	RANGE	NOTES
53	L	San Francisco Bay Region, California	D	$D = 46.1 - 3.6 \cdot 10^3 \cdot I_{MAP} + 7.4 \cdot 10^4 \cdot (I_{MAP})^2$	$1 < D < 24$	
54	R	Indonesia	D	$I_{MAP} = 0.07 \cdot 0.01 \times D^1$	$2 < D < 4$	
55	R	Puerto Rico	D	$I_{MAP} = 0.06 \times D^{-0.59}$	$1 < D < 12$	
56	R	Brazil	D	$I_{MAP} = 0.06 \cdot 0.02 \times D^1$	$0.5 < D < 2$	
57	L	Hong Kong	D	$I_{MAP} = 0.02 \times D^{-0.68}$	$1 < D < 12$	
58	R	Japan	D	$I_{MAP} = 0.03 \times D^{-0.63}$	$1 < D < 12$	
59	R	California	D	$I_{MAP} = 0.03 \times D^{-0.33}$	$1 < D < 12$	
60	R	California	D	$I_{MAP} = 0.03 \times D^{-0.21}$	$0.5 < D < 8$	
61	G	World	D	$I_{MAP} = 0.02 \times D^{-0.65}$	$0.5 < D < 12$	Lower envelope
62	R	Central Alps, Lombardy, N Italy	D	$I_{MAP} = 2.0 \times D^{-0.55}$	$1 < D < 100$	•
63	R	NE Alps, Italy	D	$I_{MAP} = 0.026 \times D^{-0.507}$	$0.1 < D < 24$	•
64	L	Blue Ridge, Madison County, Virginia	D	$I_{MAP} = 0.09 \times D^{-0.63}$	$2 < D < 16$	
65	L	Val Sesia, Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 1.1122 \times D^{-0.2476}$	$1 < D < 200$	
66	L	Val d'Ossola, Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 0.6222 \times D^{-0.2282}$	$1 < D < 200$	
67	L	Valli di Lanzo, Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 1.6058 \times D^{-0.4644}$	$1 < D < 200$	
68	L	Val d'Orco, Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 1.6832 \times D^{-0.5533}$	$1 < D < 200$	
69	L	Cancia, Dolomites, NE Italy	D	$I_{MAP} = 0.74 \times D^{-0.56}$	$0.1 < D < 100$	•
70	R	Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 0.76 \times D^{-0.33}$	$2 < D < 150$	
71	R	Piedmont, NW Italy	Sh	$I_{MAP} = 4.62 \times D^{-0.79}$	$2 < D < 150$	

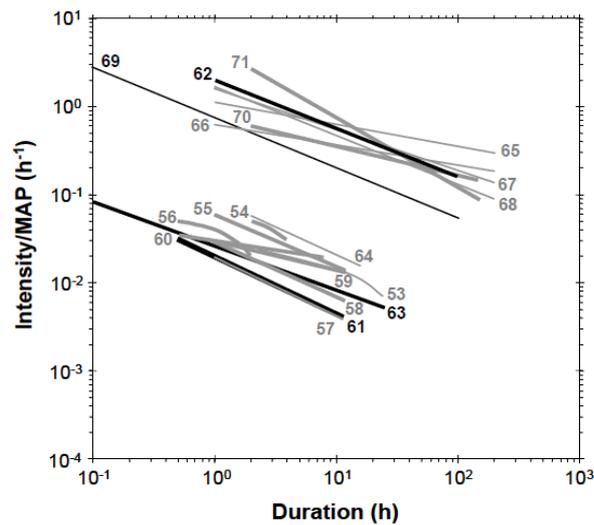


Fig. 3.3 Soglie ID normalizzate graficate dalla tabella 3.3

Osservando la figura 3.3 si possono notare immediatamente due gruppi distinti di soglie caratterizzate da un coefficiente di dispersione ridotto se paragonato alle soglie non normalizzate (fig 3.2). Questa ridotta variabilità può essere sicuramente attribuita alla normalizzazione, ma può dipendere ugualmente al numero ridotto di soglie considerate e soprattutto alle similitudini climatiche e geomorfologiche delle regioni prese in considerazione (9 di esse sono relative al Nord Italia e 3 alla California). Nonostante la normalizzazione, però, rilevanti differenze permangono tra soglie costruite per medesime aree o comunque regioni confinanti (62, 63, 69) e queste sono da attribuirsi, ancora una volta, all'incompletezza e alla disomogeneità dei dati presi in esame.

### 3.5 Soglie empiriche in termini di pioggia cumulata antecedente

Un'altra tipologia di soglia empirica è quella espressa in termini di piogge cumulate antecedenti l'evento franoso.

“Il livello di falda sotterraneo e l'umidità del suolo sono fattori che concorrono all'innesco di frane” (Crozier 1986). Determinare con precisione i suddetti valori, però, risulta molto complicato poiché questi sono condizionati da numerosi fattori, tra cui la storia degli eventi meteorici antecedenti e la temperatura. Il modo più semplice e più utilizzato per cercare di determinare con sufficiente precisione l'influenza che tutti i suddetti parametri hanno sull'innesco di un evento franoso, è quello di considerare l'intensità e la durata delle precipitazioni antecedenti uno smottamento.

Nel caso dei terreni a grana grossa caratterizzati da valori di permeabilità satura elevati, all'arrivo o al termine dell'evento di pioggia, si verifica una diminuzione repentina di suzione che a sua volta provoca una diminuzione di resistenza a taglio e un possibile innesco di frana. Pertanto più i terreni superficiali sono impermeabili maggiore è la durata critica della pioggia capace di innescare la frana e più significativo è il ruolo delle piogge antecedenti l'evento critico e il contenuto d'acqua iniziale.

Quando si utilizza un approccio di questo tipo, però, la principale difficoltà è quella di determinare il periodo nel quale considerare gli eventi meteorici e quindi "accumulare" le precipitazioni antecedenti.

Se si considerano le numerose soglie esistenti in letteratura, vi è una significativa variabilità del suddetto periodo :

- Cardinali et al. stabilirono che in Umbria sia probabile l'innescamento di frana quando le piogge antecedenti eccedono di 590mm in un periodo di 3 mesi , o di 700mm in uno di 4 mesi;
- Kim et al., verificarono che le piogge antecedenti in un periodo di 3 gg erano determinanti per l'innescamento di frane nel centro della South Korea, mentre se si considerava il sud del paese, era l'intensità giornaliera a determinare un evento franoso.
- De Vita ha lavorato nel sud Italia ed ha stabilito che per un periodo di tempo da 1 a 19 giorni prima dell'evento, per determinare un innescamento di frana, sono necessarie intensità di pioggia giornaliere decrescenti, al crescere del periodo di tempo considerato, mentre per un periodo più lungo (fino a 60 gg) il valore di intensità diventa stazionario e corrisponde a 50 mm.

Tutte queste discordanze sul periodo antecedente su cui fare riferimento per analizzare gli eventi meteorici possono dipendere da diversi fattori , quali :

- ✓ Diverse condizioni litologiche e morfologiche delle regioni di riferimento;
- ✓ Diverse condizioni climatiche e meteorologiche che condizionano anche la vegetazione, determinante nei processi di frana;
- ✓ Variabilità della profondità litografica della superficie di crisi
- ✓ Variabilità e incompletezza dei dati presi in considerazione per determinare le soglie.

### 3.6 Soglie empiriche definite per la Campania

A seguito di diversi eventi franosi catastrofici avvenuti in Campania (es. Sarno 1998, Nocera Inferiore 2005, Ischia 2006), del tipo colata rapida, diverse soglie pluviometriche di tipo empirico sono state formulate per la regione in questione. Le soglie maggiormente usate in Campania sono quelle espresse in termini di Intensità – Durata e di seguito ne sono riportate due (fig. 3.4):

$$I = 176,4 * D^{-0,9} \quad 0,1\text{hr} < D < 1000\text{hr} \quad \text{Guadagno (1991)}$$

$$I = 28,10 * D^{-0,74} \quad 1\text{hr} < D < 600\text{hr} \quad \text{Calcaterra (2000)}$$

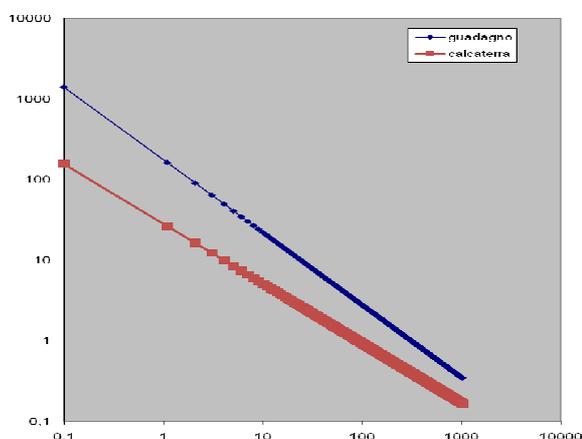


Fig 3.4 soglie pluviometriche implementate dalle equazioni di Calcaterra e Guadagno.

### 3.7 Esempi di sistemi di allarme e prevenzione basati su soglie pluviometriche

Al giorno d'oggi, vi sono diverse regioni nel mondo nelle quali le soglie pluviometriche costituiscono la base di sistemi di allarme e prevenzione dei disastri idrogeologici: in questi territori si adoperano, appunto, un confronto tra i parametri misurati e le soglie precedentemente sviluppate per andare a valutare il rischio di innesco e le eventuali azioni da intraprendere. In particolare si citano a titolo di esempio :

1. *San Francisco Bay region , California* : è stato sviluppato un sistema di allarme dal 1985, finanziato dal National Weather Service e da altre agenzie governative locali. Il sistema è basato su relazioni analitiche ed empiriche tra precipitazioni e inneschi di frana e si fonda su monitoraggi computerizzati in tempo reale di tutti i dati delle precipitazioni.

2. *Hong Kong* : è presente un sistema di allarme basato sugli studi di Brand et al.(1984) secondo il quale, per la regione di Hong Kong, gli inneschi di frana sono causati principalmente da forti intensità di pioggia per periodi di breve durata, con un valore di soglia di circa 70mm/h.
3. *Japan* : la frequenza di colate rapide in Giappone è strettamente legata all'intensità e alla durata di precipitazioni ed è andato sviluppandosi un sistema di allerta basato su modelli che studiano i processi di infiltrazione nei terreni( Iwamoto 1990)
4. *Rio de Janeiro, Brazil* : è stato installato nel 1996 un sistema di controllo e di allarme contro le frane meteo indotte ed, in particolare, si vanno a considerare le seguenti informazioni: previsione delle precipitazioni di breve periodo (4 giorni) con radar meteorologici, analisi dei parametri pluviometrici con l'istallazione di 30 pluviometri automatizzati e, infine, registro delle frane passate nella regione.

### **3.8 Vantaggi e limiti delle soglie proposte e conclusioni**

Il più grande vantaggio delle soglie empiriche è che esse si basano su parametri di precipitazioni relativamente semplici ed economici da rilevare e da misurare. Dove sono rilevabili è possibile costruire soglie locali o regionali, mentre dove i dati necessari non sono attendibili soglie globali possono dare un limite inferiore sotto il quale un evento franoso ha scarsissime probabilità di accadimento.

Le soglie empiriche hanno tuttavia diverse limitazioni :

- ✓ Numerosi dati di pioggia e molti eventi franosi dovuti a diverse storie di pioggia dovrebbero essere analizzati per rendere tali soglie affidabili, inoltre per le soglie ID la risoluzione temporale delle piogge critiche dovrebbe essere almeno oraria;
- ✓ Le soglie intensità – durata ID , non considerando gli eventi precedenti e le relazioni che questi hanno con i parametri idrologici dei suoli, sono poco indicate per la previsione di frane profonde e per quelle che si innescano diverse ore dopo la fine di una precipitazione;
- ✓ Le soglie che considerano gli eventi precedenti, sono meglio predisposte per considerare tutti gli eventi franosi, ma sono molto discordanti tra loro per la grande variabilità del periodo antecedente preso in considerazione;

- ✓ In generale tutte le soglie empiriche trascurano completamente il ruolo degli aspetti legati ai terreni, quali la geometria dei pendii e la stratigrafia del sottosuolo, la permeabilità e le proprietà idrauliche del mezzo giocano nell'innesco di un evento di frana.

## CONCLUSIONI

L'ultimo trentennio è caratterizzato da una serie sempre crescente di catastrofi naturali: un uso sconsiderato del suolo dovuto ad un incessante aumento della popolazione continuamente bisognosa di nuovi spazi dove insediarsi, ha esposto l'intero territorio ad un rischio idrogeologico sempre maggiore e, oggi, ogni evento franoso ha un potenziale di danno estremamente elevato.

Per la mitigazione del rischio di frana esistono due tipologie di interventi:

- Interventi strutturali: fanno parte di questa categoria tutte quelle opere ingegneristiche atte per lo più al contenimento dei danni causati da eventi futuri, come ad esempio muri di contenimento, vasche di raccolta, sistemi di canalizzazione delle acque e dei fanghi, modellazione dei pendii
- Interventi non strutturali: si fondano su un'attenta analisi di tutti i parametri e grandezze che intervengono nella destabilizzazione dei versanti e mirano, al contrario dei precedenti, ad una prevenzione dei disastri attraverso una previsione nello spazio e nel tempo di successivi eventi. Le soglie pluviometriche si collocano in questa categoria.

Relativamente alle colate di fango, la comunità scientifica, con gli enti territoriali, è indirizzata, allo sviluppo di interventi non strutturali per la messa appunto di piani di emergenza in grado di evitare o comunque contenere altre perdite in termini di vite umane e beni materiali. In quest'ottica, le soglie pluviometriche giocano un ruolo fondamentale, esse possono essere di due tipi:

- soglie empiriche: sono molto diffuse perché di semplice formulazione, ma non tengono conto delle proprietà del terreno quali, ad esempio, la stratigrafia, la permeabilità, la geometria, il contenuto d'acqua e la vegetazione.
- soglie fisicamente basate: considerano tutte le proprietà del terreno, tuttavia esse sono molto costose e non sempre si dispone di tutte le tecnologie necessarie per monitorare e analizzare i parametri significativi.

La prospettiva futura è senza dubbio quella di riuscire a formulare una tipologia di soglia semplificata come quella empirica, che però si fonda su un'analisi di tutte le variabili legate alle proprietà del terreno dal momento che queste influenzano i meccanismi di innesco di frana. In più è necessaria una classe politica responsabile e istruita per la formulazione di adeguati piani di emergenza, integrati alle suddette soglie, in grado di evitare ulteriori perdite in materia soprattutto di vite umane.

## BIBLIOGRAFIA

Aleotti P. (2004) – A warning system for rainfall-induced shallow failures, *Engineering Geology*, 73 : 247-265

Belfiore G. e Urciuoli G. (2006) – Rapporto sull'influenza della vegetazione sulla stabilità delle coltri piroclastiche. Rapporto per il commissariato emergenza idrogeologica della Campania. Università degli Studi Di Napoli.

Brand EW, Phillipson HB , (1984) – Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. In: *Proceedings 4<sup>th</sup> International Symposium on Landslides.*, Toronto 1 : 377-384

Cardinali M, Galli M, Guzzetti F, Ardizzone F, Bartoccini P (2005) – rainfall induced landslides in December 2004 in South-Western Umbria, Central Italy. *nat Hazard earth sys* 6 : 237-260

Cascini L. e Sorbino G. (2005) – The contribution of soil suction measurements to the analysis of flowslide triggering.

Crosta GB (1989) – A study of slope movements caused by heavy rainfall in Valtellina (Italy – July 1987). In : *Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference and Field Workshop on Landslides ALPS*. Milano : Ricerca scientifica ed educazione permanente 79b, 247-258

Crozier MJ (2006) – landslides : causes, consequences and environment. London : Croom Helm 2 : pp 467-488

De Vita P (2000) – Fenomeni di instabilità delle coperture piroclastiche dei monti Lattari, di Sarno e di Salerno (Campania) ed analisi degli eventi pluviometrici determinati. *Quaderni di Geologia Applicata*, 7 : 213-235

Di Crescenzo G. e Santo A. (2005) – debris slides – rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (southern Italy) : morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility. *Geomorphology*, vol. 66 pp 57 - 65

Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. (2007) - Rainfall threshold for the initiation of landslides in central and southern Europe , *Meteorology and Atmospheric Physics*, Volume 98, 3-4, pp 239-267

Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M. (2005) – Definition of critical threshold for different scenarios, Action 1.16. RISK AWARE - Advanced weather forecast system to advise on risk events and management

Iwamoto M (1990) – Standard amount of rainfall for warning from debris disaster. In : *Proceedings 6<sup>th</sup> International conference and field workshop on landslides ALPS 90* (Cancelli A, ed) 79b : 77-88

Kim SK, Hong WP, Kim YM (1991) – Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea. In: *Landslides* (Bell DH ed). Rotterdam : A.A Balkema 989-994

Nadim, F., Cepeda F, Sandersen F., Jaedicke C. – Prediction of Rainfall-Induced Landslides through empirical and numerical models. Rainfall-induced landslides The first italian workshop on landslides, IWL 2009 Naples

Picarelli L., Vinale F. (2009) – Un laboratorio integrato finalizzato allo studio delle colate di fango in terreni piroclastici, AMRA S.c.ar.l

Scotto di Santolo A., Evangelista A. (2007). Previsione dell'innesco di fenomeni superficiali nella coltre piroclastica non satura dei versanti della città di Napoli. Progetto PETIT-OSA monitoraggio frane : contributo alle conoscenze sulla franosità in Campania. ARANCNE editrice