

## **2.6 Relazioni precipitazioni - variazioni pressioni interstiziali**

La possibilità di correlare l'andamento dei livelli piezometrici nel sottosuolo con quello delle precipitazioni meteoriche costituisce un elemento fondamentale nello studio del ruolo delle piogge nelle instabilità di pendio. Infatti si può, attraverso metodi classici o di più recente acquisizione (metodi numerici), verificare la distribuzione delle pressioni interstiziali che inducono condizioni di precaria stabilità in un determinato versante da un lato, stabilire le relazioni tra gli eventi meteorici e le pressioni dell'acqua nel sottosuolo dall'altro, in modo da ottenere una correlazione indiretta tra piogge e frane e su questa, infine, basare studi previsionali.

Le correlazioni tra le due variabili in oggetto possono essere individuate sia sulla base di modelli matematici proposti in letteratura, di cui il modello di Reid (prf. 1.2) costituisce uno dei primi validi esempi, sia attraverso i dati sperimentali provenienti da sistemi di monitoraggio. I modelli matematici circa le relazioni precipitazioni - variazioni pressioni interstiziali risultano, spesso, di non facile applicazione in quanto risentono di ipotesi e semplificazioni che rendono il loro utilizzo molto incerto in aree diverse da quelle dove sono stati testati; essi, generalmente, tengono conto principalmente della permeabilità dei terreni, proprietà certamente fondamentale ma non sufficiente per aree sede di fenomeni estremamente complessi quali quelle della Fossa Bradanica, in cui solo una interpretazione dei caratteri evolutivi dei versanti può dare indicazioni circa le modalità di circolazione delle acque sotterranee e l'insorgere di instabilità a seguito di eventi pluviometrici.

In questo studio pertanto si è preferito fare riferimento a dati reali provenienti da sistemi di monitoraggio, anche in ambienti geologici simili a quelli dell'area bradanica, e a dati sperimentali acquisiti dalla stazione di monitoraggio denominata Poma1, la cui progettazione e realizzazione sono state da me personalmente curate sotto la supervisione del prof. Alberto Prestininzi (Dip. Sc. della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza") ed in collaborazione con la Dott. Francesca Bozzano (Dip. Sc. della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza") e l'ing. Maurizio Polemio (CNR, CERIST, Politecnico di Bari).

Un primo contributo proviene dai sistemi di monitoraggio di alcuni fenomeni franosi in terreni argillosi del segmento centrale dell'avanfossa appenninica (province di Pesaro e Chieti). I primi dati, contenuti in una nota di Baldelli et al. (1998), sottolineano l'importanza della conoscenza geologica dei siti che si intende investigare e quindi della

classificazione dei fenomeni franosi, sulla base delle quali scegliere la tipologia della strumentazione da utilizzare e la frequenza dell'acquisizione dei dati. I fenomeni monitorati possono essere classificati come frane traslazionali; hanno superfici di scivolamento piane e grossomodo parallele alle superfici topografiche. Spesso sono frane composte, hanno cioè anche una componente rotazionale soprattutto nella zona di testata, ed anche multiple, con la ripetizione di più frane rotazionali; il movimento della massa è comunque prevalentemente costituito da uno scorrimento lungo superfici parallele ai pendii. Le profondità di tali superfici sono estremamente variabili: le frane monitorate hanno profondità di scivolamento comprese tra quelle molto superficiali, minori di 3 m, a profondità di oltre 20-30 m. In genere si tratta della coltre eluvio - colluviale che scorre sul substrato argilloso in posto, anche se non mancano casi in cui è coinvolto anche il substrato.

La sopra citata classificazione richiama quanto esposto nei paragrafi precedenti per le frane di San Donato (Pisticci) e La Salsa (Pomarico), da cui l'importanza attribuita nel presente studio ai primi risultati di Baldelli et al. (1998).

I dati presi in considerazione riguardano il monitoraggio in continuo sia dei livelli piezometrici (registrati in più piezometri elettrici collegati a centraline di acquisizione dati) sia delle precipitazioni meteoriche. Sono disponibili anche misure mensili di altri piezometri di tipo Casagrande.

I piezometri elettrici, posti a diverse profondità nello stesso sondaggio (ch1 = -18.5 m; ch2 = -8.1 m; ch3 = -4.5 m) e letti in continuo hanno evidenziato variazioni di pressioni interstiziali che si correlano perfettamente con le precipitazioni (fig. 46). Solo in corrispondenza della cella più profonda si è osservato un certo ritardo dovuto alla bassa permeabilità dei terreni argillosi.

Da quanto osservato, gli Autori hanno concluso che:

- nelle aree collinari franose di avanfossa, caratterizzate da depositi argillosi Plio-Pleistocenici, l'andamento delle falde deve essere monitorato in continuo in quanto le variazioni, nonostante la bassa permeabilità primaria dei terreni, possono essere abbastanza repentine (dell'ordine di alcuni giorni) e quindi non essere rilevate con cadenze mensili o più basse;
- in questi terreni a bassa permeabilità primaria sono da privilegiare le celle piezometriche elettriche rispetto a quelle di Casagrande o, peggio ancora, ai piezometri a tubo aperto in quanto, avendo bisogno di mobilitare quantitativi minori di acqua, sono più sensibili e più pronti alle variazioni di pressione interstiziale.

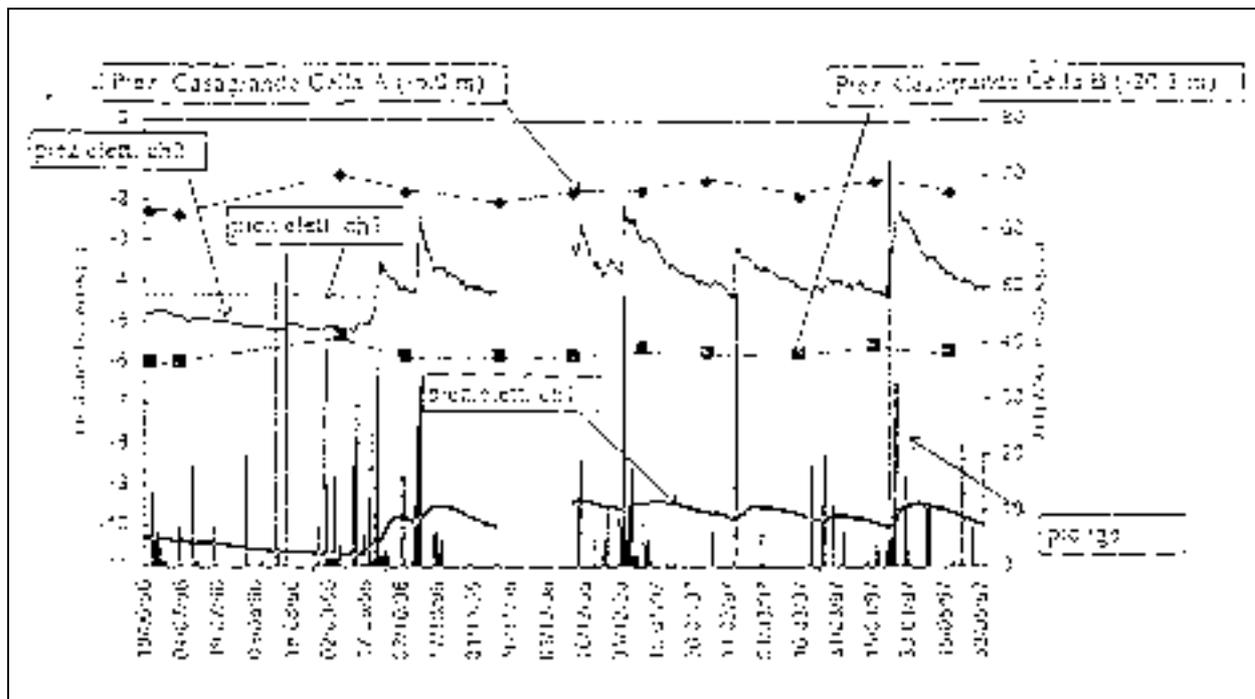


Figura 46. Livelli piezometrici e andamento delle precipitazioni misurati in una località del comune di Pennabilli (PS). (Da Baldelli et al., 1998)

### 2.6.1 Il monitoraggio dell'abitato di Pisticci

Il sistema di monitoraggio di Pisticci comprende, tra le numerose componenti, due sondaggi geognostici (P1 e P2, ubicazione in fig. 23) attrezzati ciascuno con una coppia di celle piezometriche assolute di profondità secondo le modalità riportate in fig. 47.

La stratigrafia dei sondaggi è riportata nelle figure 48 e 49: si riconoscono i termini del terrazzo marino (0.20 - 10.40 m di profondità in fig. 49; 0-1.20 m in fig. 48) ed i sottostanti termini ascritti alla formazione delle Argille Subappennine.

I dati disponibili sono relativi al periodo maggio '93 - gennaio '95. Tali dati sono stati correlati con l'andamento delle piogge giornaliere nello stesso periodo (figg. 50 e 51). Le misure relative ai piezometri più profondi e i dati dei sondaggi disponibili confermano l'ipotesi (vedi par. 2.3) dell'esistenza di una falda freatica il cui limite inferiore è contenuto nella parte alta delle Argille, in corrispondenza di una variazione litologica da termini sabbioso - limosi e limoso - sabbiosi a depositi prevalentemente limosi e argillosi.

Il piezometro 2 del sondaggio P1 (fig. 51) mostra un'oscillazione massima del carico piezometro fino a circa 18 metri e mostra, altresì, una buona correlazione con l'andamento delle piogge ed una risposta alle stesse compresa tra pochi giorni e circa un mese. La risposta dipende chiaramente dalla stagionalità dell'evento piovoso e dalla

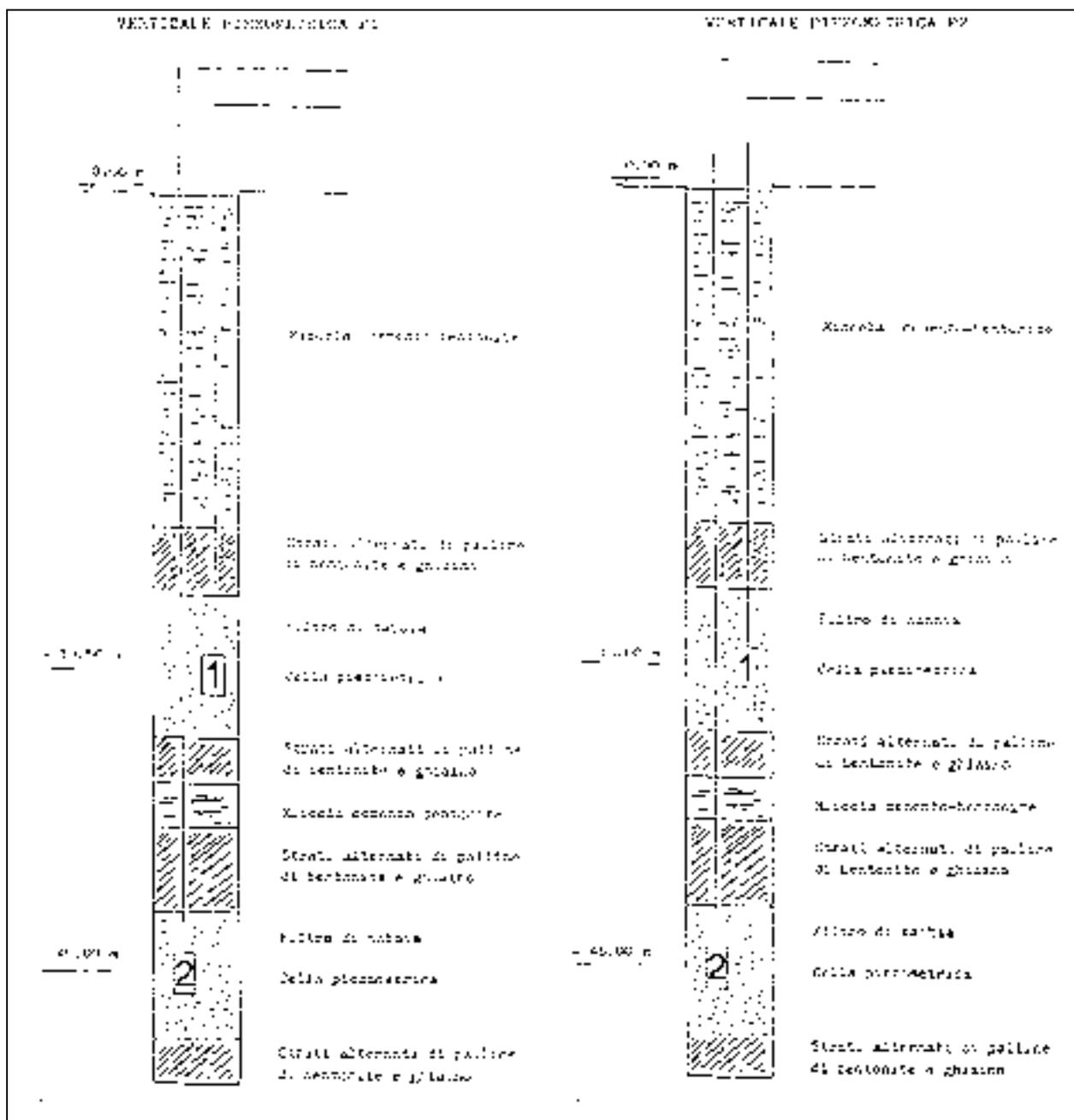


Figura 47. Modalità di posa in opera dei piezometri. (ICLA, 1990)

quantità di pioggia caduta nel periodo precedente un determinato evento; infatti piogge isolate non producono oscillazioni a breve termine, ma contribuiscono solo alle oscillazioni stagionali della falda, tutto ciò molto probabilmente è connesso con il grado di saturazione dei terreni come delineato nel paragrafo 1.2.2 (figg. 2 e 3). Al contrario il piezometro più profondo della verticale P2, mostra un ritardo notevole (fino a due mesi) nella risposta alle piogge, forse a causa di un minore coefficiente di permeabilità dei terreni.

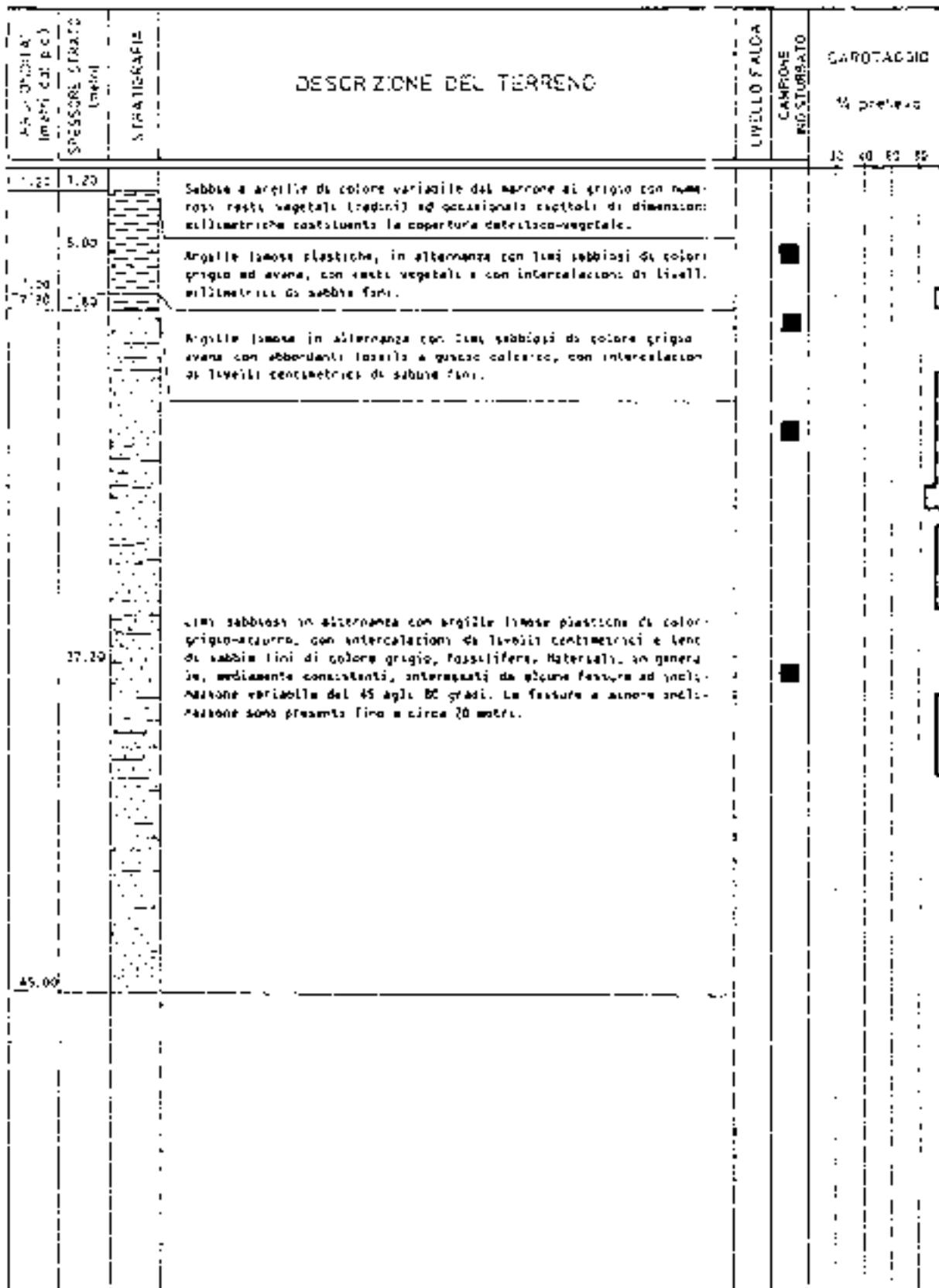


Figura 48. Stratigrafia del sondaggio P1 (ubicazione in fig. 23). (ICLA, 1990)

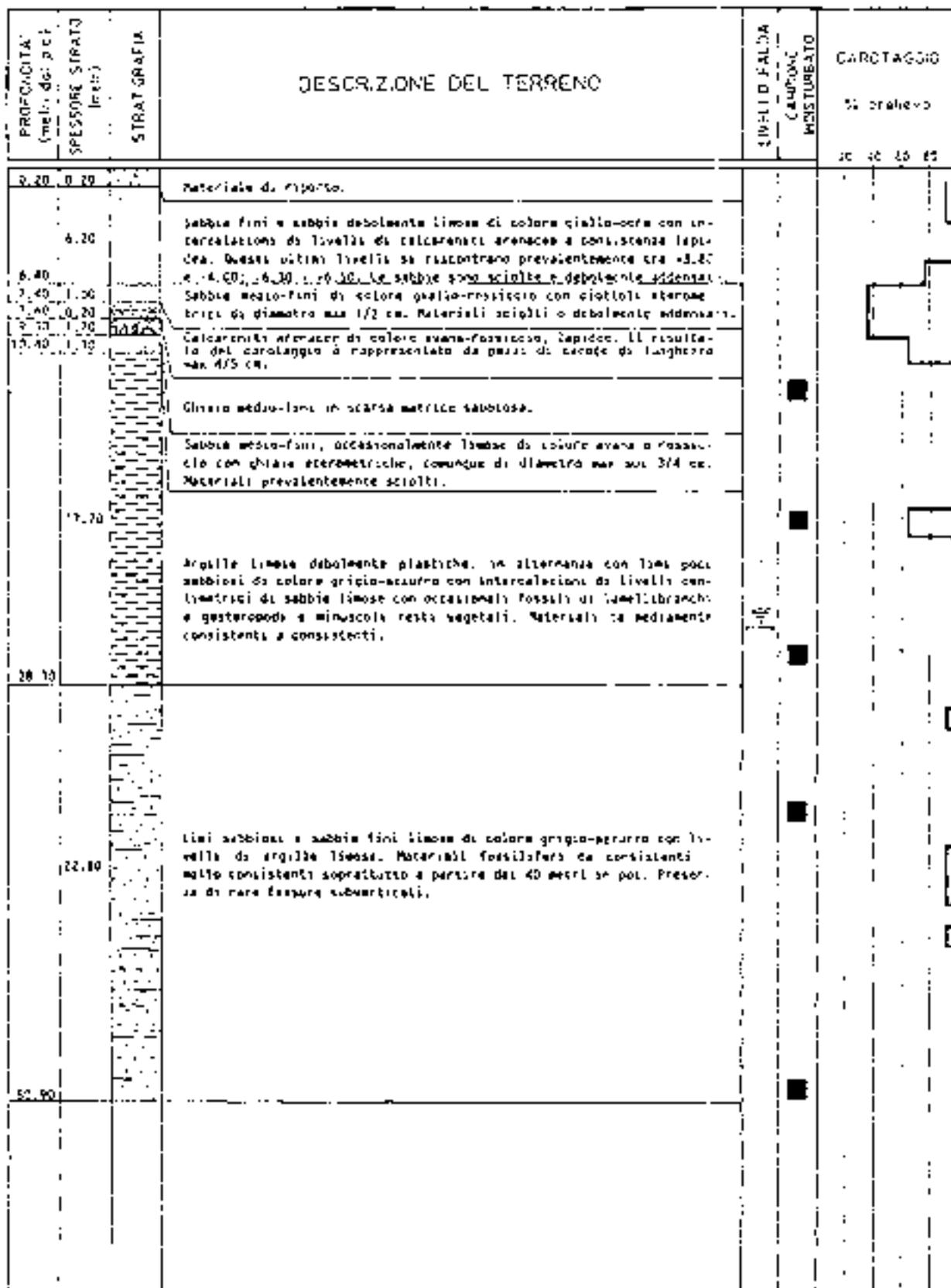


Figura 49. Stratigrafia del sondaggio P2 (ubicazione in fig. 23). (ICLA, 1990)

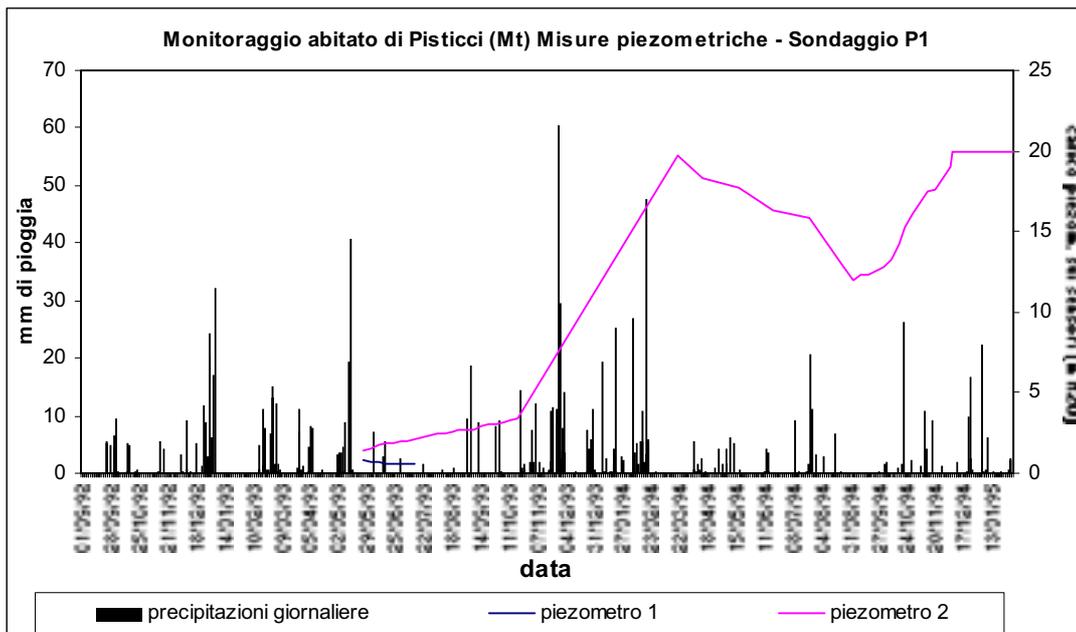


Figura 50. Verticale piezometrica P1: correlazione tra il carico piezometrico e le precipitazioni giornaliere.

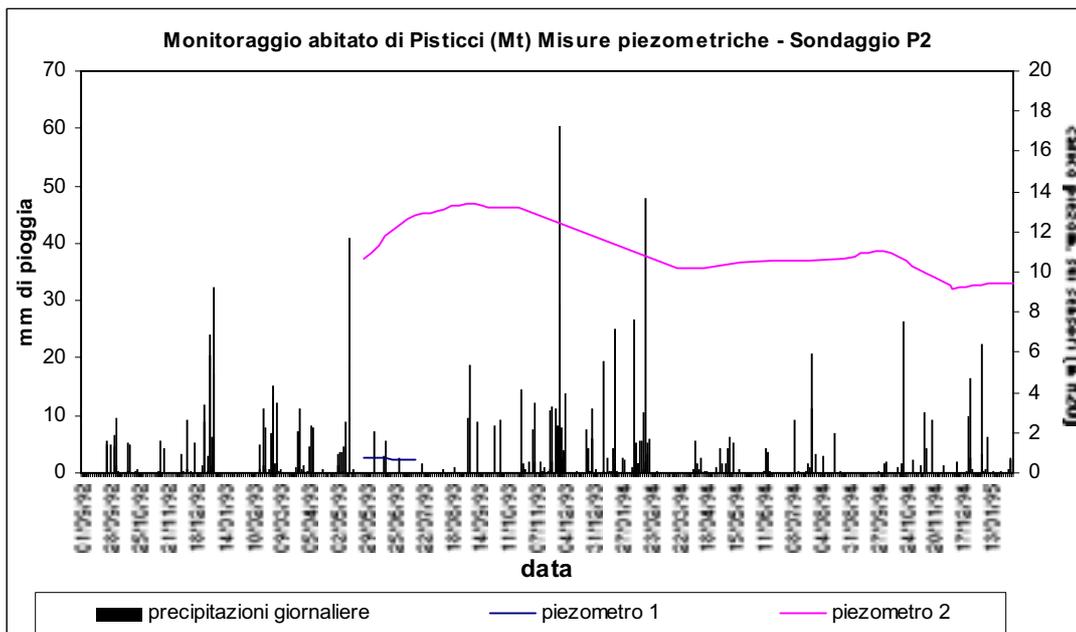


Figura 51. Verticale piezometrica P2: correlazione tra il carico piezometrico e le precipitazioni giornaliere.

I dati e le considerazioni scaturite dal monitoraggio di Pisticci costituiscono, come si vedrà nei prossimi capitoli, una base sperimentale fondamentale per l'elaborazione del modello previsionale.

### 2.6.2 La stazione di monitoraggio "Poma1"

Al fine di ottenere misure sperimentali dirette delle variazioni delle pressioni interstiziali nei terreni detritici e argillosi, è stata progettata e messa in opera la stazione di monitoraggio Poma1.

Il sistema è stato ubicato in corrispondenza del versante SW della dorsale di Pomarico caratterizzata dall'affioramento, a partire dal fondovalle, di (fig. 52): Argille Subappennine, Sabbie di Monte Marano, argille limose e sabbie limose di origine lacustre, depositi sabbioso - conglomeratici continentali. Il pendio oggetto di approfondimento è sede di una coltre detritica di origine franosa e eluvio - colluviale distinta in due termini: uno prevalentemente sabbioso in affioramento nella parte medio - alta e uno prevalentemente limoso - argilloso nella parte bassa.

L'intero versante mostra chiari segni di antichi fenomeni franosi complessi del tipo scorrimento roto - traslazionale, colata, il cui stato di attività è molto basso: infatti sono stati rilevati solo indizi di movimenti superficiali della coltre detritica.

Il censimento e la misura del livello di acqua nei pozzi ha permesso di individuare la presenza di una falda contenuta nei detriti ed, in più punti, in contatto idraulico con i depositi sommitali (vedi anche prf. 2.1.4). L'andamento della falda è descritto in figura 52 dalle isopieze ottenute elaborando statisticamente, con la tecnica del Kriging, le misure puntuali ai pozzi. Il monitoraggio degli stessi (marzo '97 - marzo '98) ha evidenziato un'oscillazione massima del livello di acqua fino a 3 m.

La scelta di un'area a bassa attività franosa recente è stata dettata dalla necessità di avere informazioni sull'insorgere di sovrappressioni neutre a seguito di precipitazioni in una determinata litologia e non dalla finalità di monitorare un movimento di versante; infatti un'eventuale ubicazione in aree attive avrebbe potuto causare fino alla totale perdita dell'intero sistema.

La stazione di monitoraggio (fig. 53) è composta da:

- 1 centralina di acquisizione dati (memoria RAM interna da 64 Kb);
- 1 batteria tampone da 45 Ah;
- 1 alimentatore da rete 220V - 12V;
- 1 pluviometro (0.2 mm) su palo e bocca tarata da 1000 cm<sup>2</sup>;
- 2 piezometri elettrici per misura assoluta (range 0 - 2 bar, uscita 4..20 mA);
- 2 protezioni da sovratensioni e correnti vaganti verso i sensori;
- 1 modem cellulare GSM per interrogazioni da computer remoto.

Figura 52. Dorsale di Pomarico: carta geologica con elementi di idrogeologia.

## LEGENDA

**DETRITI DI FRANA E/O DI VERSANTE:** accumuli detritici di varia natura: prevalentemente sabbiosi (a), contingenti acquiferi di una certa importanza locale e rappresentati, in la serie di classica, quella a maggiore estensione; (b) prevalentemente argillosi, a seconda della permeabilità possono dar luogo ad una circolazione idrica estenuante che comunque rimane sempre limitata. Spessori del complesso molto variabili e compresi tra qualche metro e alcune decine di metri.



**DEPOSITI CONTINENTALE:** depositi continentali sabbioso-conglomeratico, massassi, privi di strutture e di spessore molto variabile. Contengono piccole falde di modesto spessore.



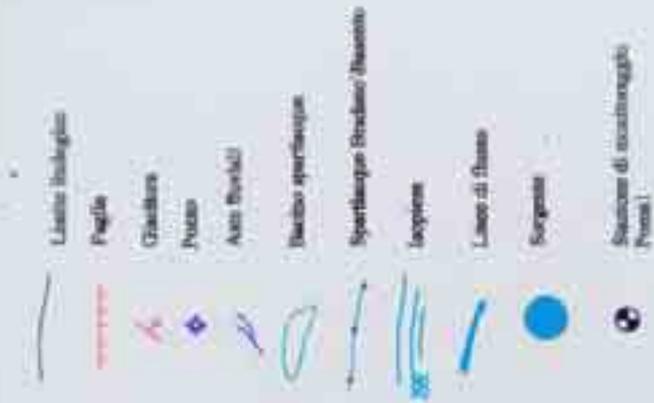
**ARGILLE LACUSTRI:** argille limose di colore verde chiaro, a larghi passanti a sabbie limose gialle finemente stratificate, con laminazioni incrociate e con alla base, non sempre presenti, depositi piroclastici. Rappresentano il limite a flusso rapido per le piccole falde sovrapposte concentrate nei depositi continentali sommitali.

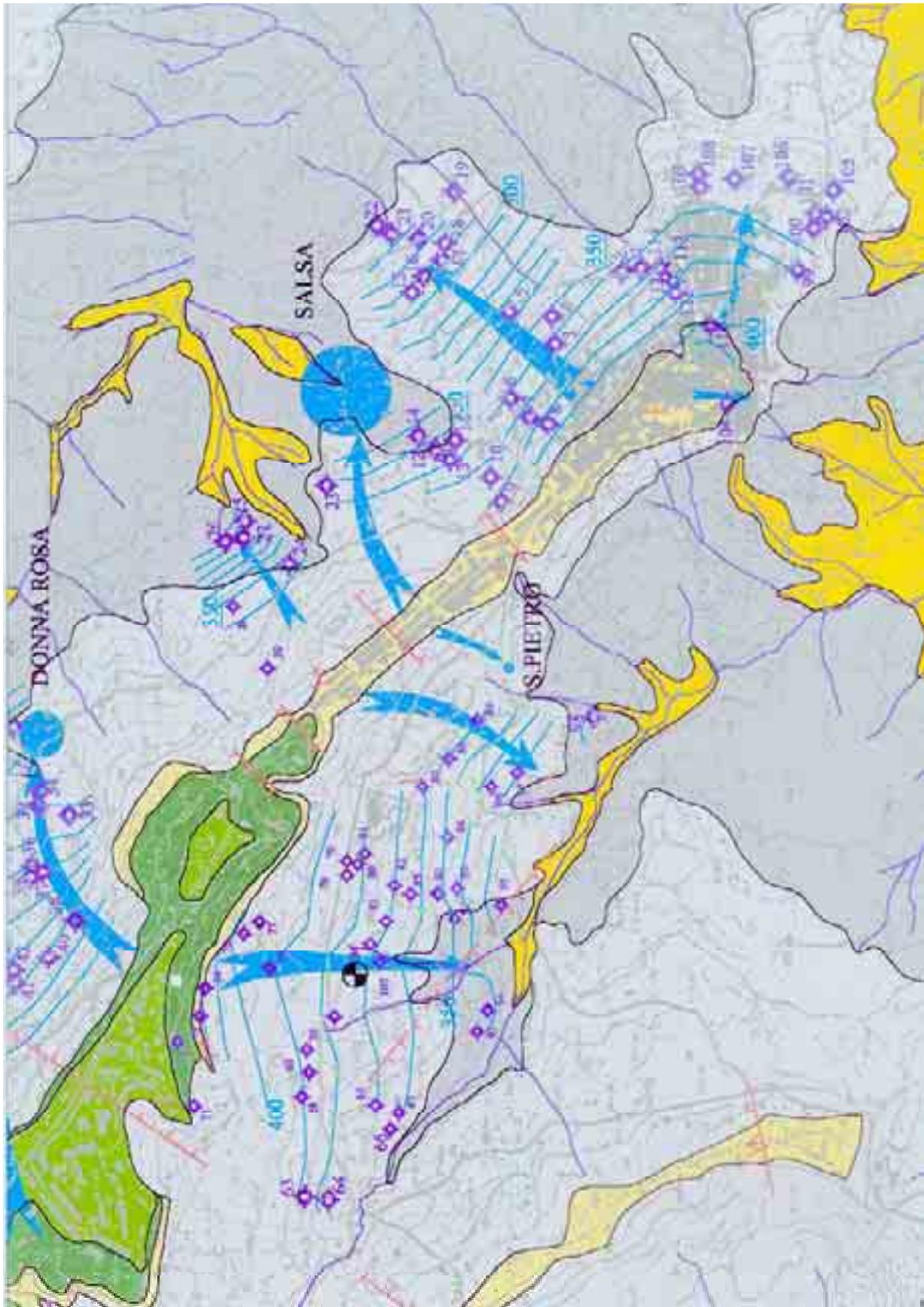


**SABBIE DI M. MARANO e DEPOSITI MARINI TERRAZZATI:** Sabbie fini e grossolane, con livelli concenati; di color giallo e con laminazioni incrociate e piano parallele; sabbie in banchi alla base e più sottilmente stratificate verso l'alto; conglomerati eterocentrici, talora cementati che poco cementati, micriticati verso l'alto e con lenti sabbiose di piccolo spessore. Cambiogram, spesso, acquiferi di una certa importanza locale. Lo spessore del complesso è di circa 50 m.



**ARGILLE SUBAPPENNINE:** Argille incoloro-olivacee e fangose concoidi, passanti verso l'alto a terreni limosi e limo-argillosi, stratificati, di colore grigio-azzurro. Il complesso rappresenta il limite a flusso rapido per gli acquiferi contenuti nel complesso sismomassassi.





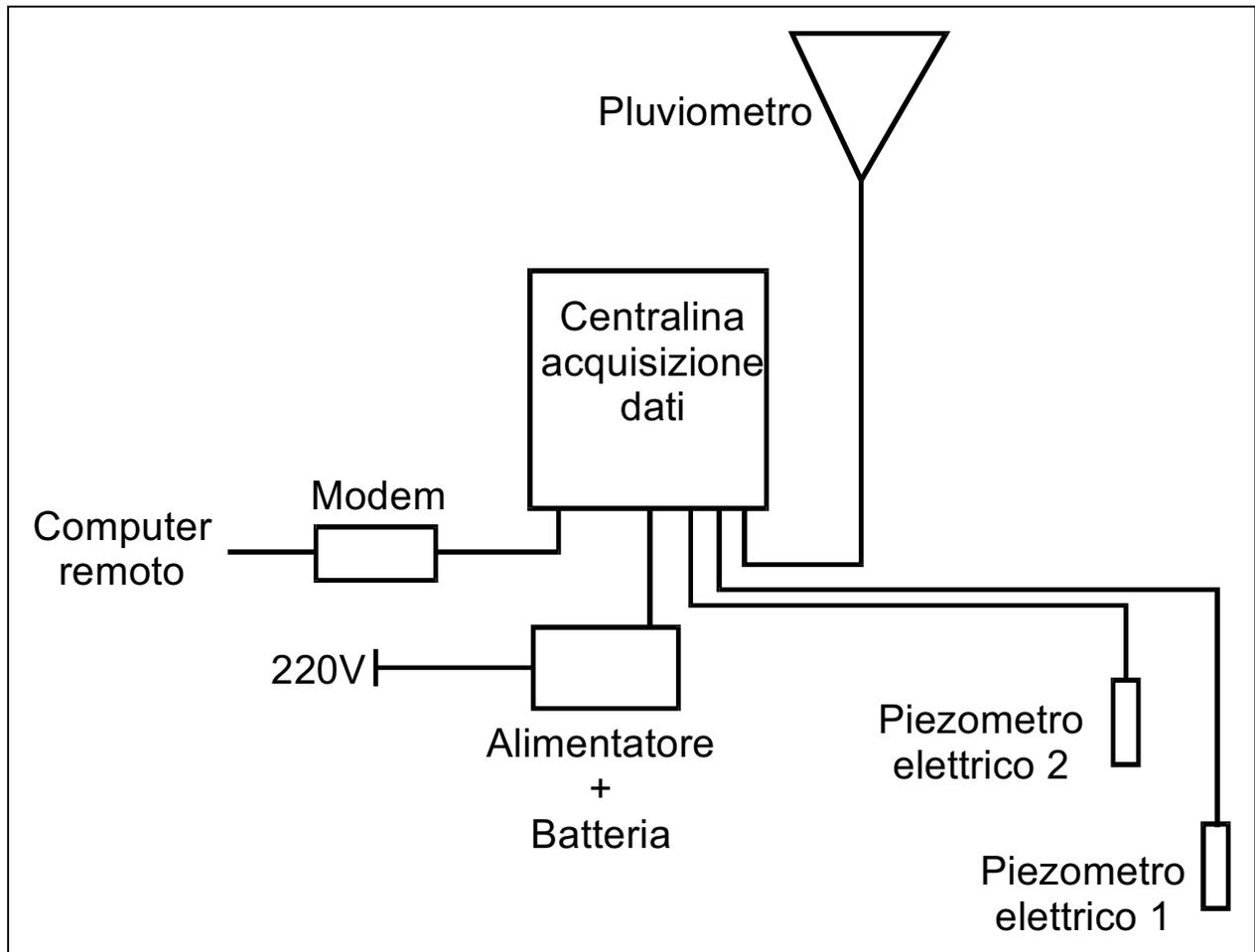


Figura 53.

I primi tre elementi sono stati alloggiati nella casa di campagna dell'Ing. Geol. Michele Lupo e connessi alla corrente elettrica.

Il pluviometro è stato fissato sul tetto di detta abitazione.

I piezometri elettrici sono stati posizionati in un unico foro a diverse profondità secondo le modalità riportate in figura 54.

I dati di sondaggio (fig. 54) hanno evidenziato la presenza di una spessa coltre detritica di frana: i depositi compresi tra le profondità 1 m - 14.5 m appartengono chiaramente ai termini definiti di transizione (parte alta delle Argille Subappennine, vedi prf. 2.4) ed, in parte alle Sabbie sovrastanti; tali termini risultano quindi essere dislocati dalla posizione originaria a causa di fenomeni franosi ripetuti nel tempo. La discontinuità individuata alla profondità 14.5 m potrebbe essere il limite tra il materiale dislocato e le Argille in posto.

Un ultimo importante dato riguarda la posizione della falda: questa è stata trovata esattamente alla profondità prevista dall'elaborazione statistica dei dati dei pozzi, a conferma dell'ipotesi della presenza di un'unica grande falda acquifera contenuta nei detriti.



Quanto sinora esposto, ha suggerito di posizionare il piezometro più profondo in modo di monitorare l'andamento della falda ad importanza locale contenuta nei detriti. Il secondo piezometro è stato posto ad una profondità tale da permettere valutazioni circa le variazioni di pressioni interstiziali nella parte più superficiale e più alterata della coltre detritica. (Fig. 54)

I dati disponibili sono relativi al periodo marzo - ottobre 1999 e sono riportati nelle figure 55 e 56. Il sistema è stato programmato per letture dei sensori ogni 10 minuti: nel caso dei piezometri la registrazione è a cadenza oraria e comprende il massimo valore letto nell'ora, il minimo e la media; nel caso del pluviometro i dati sono riferiti alla pioggia oraria cumulata.

Le misure registrate al piezometro 1 (fig. 55) mostrano le fasi di stazionamento alto e di scarica della falda contenuta nei detriti. Tra le due fasi esiste una differenza di altezza di colonna d'acqua pari a circa 1.5 m. Nella prima fase (stazionamento alto) si può notare una risposta piezometrica alle piogge dell'ordine della decina di centimetri e con un ritardo fino a 5 giorni dall'evento pluviometrico: sia la variazione di livello piezometrico sia i tempi di risposta risultano grandemente influenzati dall'esplicarsi di più eventi pluviometrici ravvicinati. In altre parole la variazione è maggiore e il tempo di risposta è minore nel caso in cui il periodo precedente all'evento di pioggia a cui sono correlabili sia stato piovoso o meno. Nel caso della fase di scarica (periodo settembre - ottobre) si possono fare lo stesso tipo di considerazioni, ma il sensore ha registrato variazioni più contenute e tempi di risposta più lunghi, fino a 10 giorni.

Per quanto riguarda il piezometro 2 (fig. 56), il meno profondo (vedi fig. 54), sembrano valere le osservazioni del caso precedente. Le misure variano intorno al valore 50 cm di colonna d'acqua. Tali dati necessitano evidentemente di un monitoraggio più lungo per poter essere correttamente interpretati. In base alle misure sinora registrate si può solo notare che la zona più superficiale di terreno sembra risentire, in termini di variazione delle pressioni interstiziali, al regime pluviometrico. In ogni caso le variazioni sono molto contenute e certamente non in grado di creare condizioni di instabilità sia pure della parte superficiale del detrito.

I dati acquisiti costituiscono un elemento fondamentale nello studio delle modalità di infiltrazione e circolazione sotterranea delle acque di origine meteorica nelle aree di avanfossa caratterizzate dall'affioramento di coltri detritiche soggette a frequenti riattivazioni. Tali dati permetteranno di verificare le ipotesi che saranno fatte nelle modellazioni che seguono.

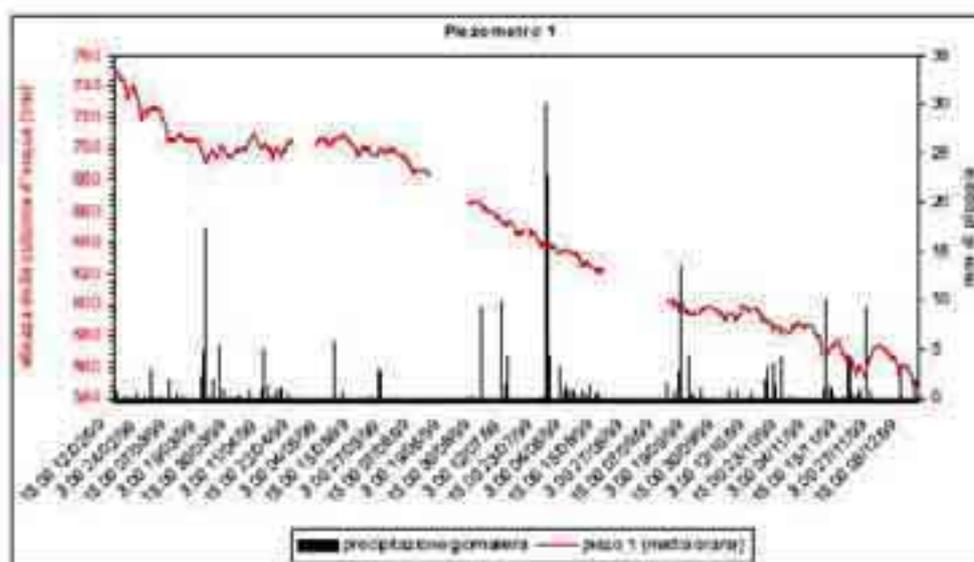


Figura 55. Confronto tra i dati di pioggia e quelli di carico piezometrico misurati al piezometro 1, profondità 14 m dal piano campagna (quota 282 m s.l.m.)

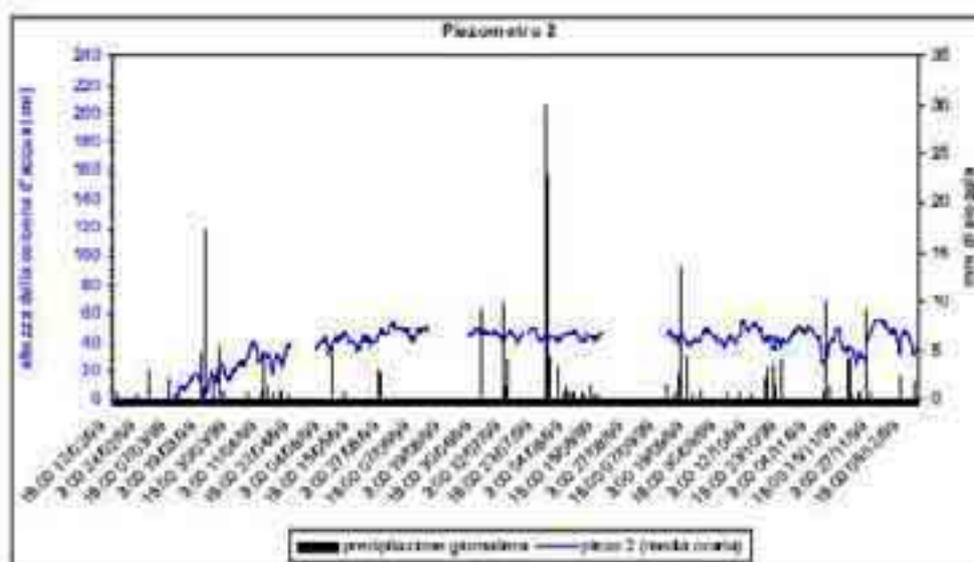


Figura 56. Confronto tra i dati di pioggia e quelli di carico piezometrico misurati al piezometro 2, profondità 4.3 m dal piano campagna (quota 282 m s.l.m.)

## Capitolo 3 - Modellazione delle condizioni di stabilità dei pendii

### 3.1 Metodi di analisi di stabilità dei versanti

I metodi che possono essere utilizzati per effettuare analisi di stabilità di versanti naturali (oppure artificiali) sono riconducibili a due principali classi: i metodi all'equilibrio limite globale (o metodi tradizionali) ed i metodi delle tensioni (o anche numerici).

I metodi all'equilibrio limite globale analizzano la stabilità di un pendio, considerando un volume di materiale predefinito, stabiliscono una superficie di distacco che, a seconda del meccanismo di rottura prescelto, può essere subparallela al pendio (pendio infinito; scorrimenti traslazionali) oppure subcircolare (pendio finito; scorrimenti rotazionali e rototraslazionali). Tali metodi risultano grandemente condizionati dalla scelta della superficie di scorrimento, dal modello di rottura adottato e dalle proprietà fisico-meccaniche attribuite ai materiali.

Le condizioni di stabilità delle masse considerate sono notoriamente indicizzate attraverso il calcolo del coefficiente di sicurezza.

I metodi delle tensioni (o numerici), di più recente acquisizione, si servono di codici di calcolo agli elementi finiti o alle differenze finite che applicano e risolvono le equazioni di equilibrio dinamico ad elementi discreti dell'intera massa considerata. Servendosi, inoltre, delle relazioni tensio-deformative introdotte con specifici modelli costitutivi scelti in base al tipo di materiale e alle condizioni simulate, essi ricostruiscono la distribuzione delle tensioni e degli spostamenti nell'intera massa di versante, evidenziando i meccanismi di instabilità a partire dalla configurazione della distribuzione delle tensioni calcolate.

L'esistenza della condizione di stabilità implica che nel sistema considerato si arrivi ad un equilibrio delle forze agenti, nelle condizioni raggiunte dal modello e con le caratteristiche meccaniche e di deformabilità attribuite agli elementi discreti della massa.

L'utilizzo di tali metodologie è spesso difficoltoso a causa del gran numero di parametri richiesti per la modellazione.

### 3.2 Il codice di calcolo FLAC

FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) è un codice di calcolo che utilizza le differenze finite ed un metodo di soluzione esplicito nel tempo. L'impiego delle differenze finite non comporta di per se alcuna differenza ai fini della soluzione numerica rispetto ai programmi che applicano gli elementi finiti; entrambi i metodi traducono un insieme di equazioni differenziali in equazioni matriciali per ciascun elemento.

Il programma opera su un sistema di elementi discreti ottenuto suddividendo lo spazio bidimensionale con una griglia ( $n \times m$ ) in cui si individuano "punti nodali" (*gridpoints*) definiti da coordinate relative ( $i, j$ ) o assolute ( $x, y$ ) e "zone" individuate da numeri di zona in coordinate relative ( $i, j$ ) o assolute ( $x, y$ ).

Le proprietà fisiche vettoriali sono attribuite ai *gridpoints* (es. velocità, spostamenti, accelerazioni, vettori flusso, etc.) mentre quelle scalari sono attribuite alla zona (es. densità, moduli elastici, coesione, attrito, etc.) ad eccezione delle tensioni e delle pressioni di poro che sono applicate ai nodi.

In ogni momento dello svolgimento possono essere applicate forze, accelerazioni, velocità o stress ai *gridpoints* posti lungo i margini esterni (*external boundaries*) o lungo i margini interni (*internal boundaries*) della griglia.

Il metodo di soluzione "esplicito, per integrazione diretta nel tempo (*time-marching*)" adotta un procedimento di calcolo ciclico non iterativo che può essere distinto nelle seguenti fasi (fig. 57):

1. Ad ogni *gridpoints* è calcolata: una massa ( $m$ ) sommando i contributi delle zone confinanti; una risultante delle forze esterne ( $F_e$ ) applicate al *gridpoints*; una risultante delle forze interne ( $F_i$ ) ottenuta integrando gli sforzi nelle zone collegate allo stesso *gridpoints*.
2. Per ogni *gridpoints* è calcolata, con l'equazione di Newton  $F = m \times a$  l'accelerazione ad esso applicata, tale accelerazione è integrata due volte nel tempo  $\Delta t$  per ottenere la velocità e lo spostamento incrementale per ogni *gridpoints*.
3. Gli spostamenti (ovvero le deformazioni) incrementali, calcolati come al punto 2, consentono di risalire alle variazioni di sforzo nelle zone della griglia.
4. La variazione degli sforzi comporta a sua volta una variazione in ogni *gridpoints* della risultante  $F_i$ ; dunque il ciclo di calcolo riparte dal punto 2 procedendo per un successivo incremento temporale  $\Delta t$ .

Ad ogni passo di calcolo (*step*) avviato con il comando SOLVE o con il comando STEP n, il programma modifica il campo di variazione degli sforzi come descritto precedentemente, attivando un'onda di calcolo (*calculation wave*) che analizza per ogni *gridpoint* il nuovo stato tensio-deformativo.

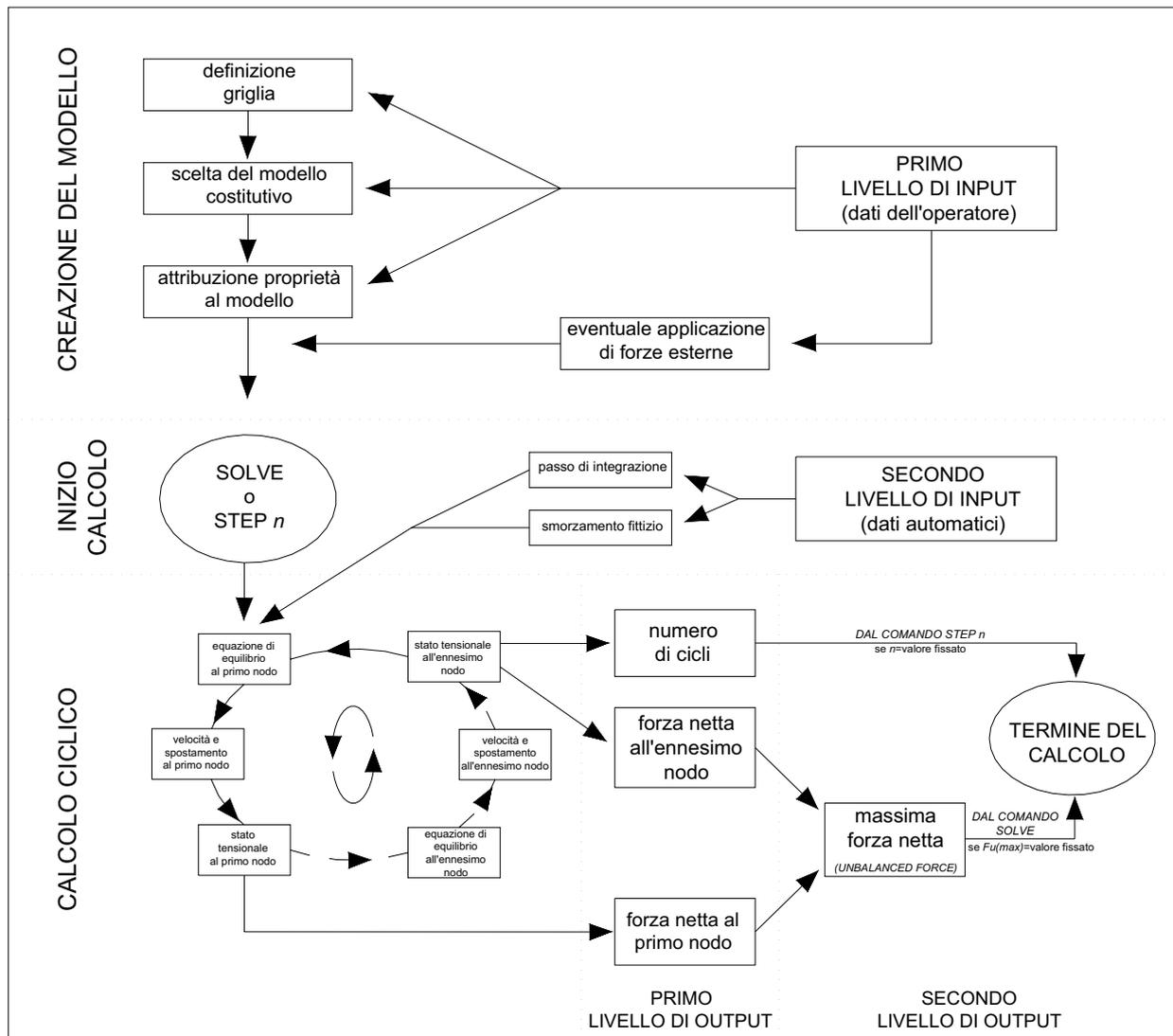


Figura 57. Schema del procedimento di calcolo ciclico non iterativo eseguito nel metodo di soluzione esplicito *time marching* utilizzato da FLAC (ridisegnato dal manuale d'uso di FLAC).

Alla fine di ogni step il programma è in grado di fornire, come dato di output, un valore di “massima forza non bilanciata” (*unbalanced force*) che rappresenta la forza netta risultante ( $F_u = F_e - F_i$ ) maggiore tra quelle calcolate ai singoli *gridpoint*. È evidente che una volta raggiunto l'equilibrio, tale forza dovrebbe essere teoricamente nulla, a significare che un ulteriore incremento temporale  $\Delta t$  non potrebbe produrre ulteriori variazioni nel campo tensio-deformativo. In pratica, però, si accetta come situazione di

equilibrio una condizione nella quale il valore dell'*unbalanced force* è diminuito di almeno 4÷5 ordini di grandezza rispetto alla massima forza netta all'inizio del processo di calcolo.

In qualunque momento del processo di calcolo possono essere ottenuti diagrammi (*history*) che descrivono l'andamento delle variabili significative (come l'*unbalanced force*, gli spostamenti, etc.) in funzione del tempo di calcolo (numero di *step* già effettuati) e mappe delle condizioni di deformazione, di stato cinematico o tensionale della griglia (*plotting*).

Il codice di calcolo FLAC offre diverse opzioni esecutive tra le quali quella di flusso di acqua nel terreno (*groundwater configuration*). Tale opzione simula nel terreno condizioni di filtrazione in regime stazionario che soddisfano l'equazione di Laplace.

Il codice di calcolo FLAC offre anche la possibilità di utilizzare un linguaggio di programmazione interno (FISH di FLAC) scritto in FORTRAN semplificato e modificato, che gestisce:

- a) comandi propri e distinti da quelli di FLAC;
- b) funzioni interne (es. funzioni matematiche) e variabili interne di griglia (es. la variabile *gflow* che rappresenta la portata di un flusso attraverso determinati *gridpoints*);
- c) variabili e funzioni esterne definite dal programmatore;
- d) alcuni dei comandi di FLAC.

### **3.3 Metodologia di analisi eseguita con FLAC**

Le simulazioni con FLAC sono state realizzate costruendo dei modelli bidimensionali ottenuti a partire da un profilo geologico del versante precedente ai fenomeni di instabilità esaminati.

Raggiunto lo stato di equilibrio iniziale, l'analisi di stabilità è stata effettuata simulando due differenti condizioni, a parità di proprietà e caratteristiche dei materiali: 1) condizioni in assenza filtrazione, 2) condizioni con filtrazione.

Le condizioni senza filtrazione sono state simulate sottoponendo il modello alla sola azione della gravità con i parametri fisici e meccanici propri dei terreni considerati per generare un campo tensionale di equilibrio iniziale del sistema nell'ipotesi di assenza di filtrazione.

In questa fase è necessario che il modello non subisca grandi deformazioni poiché l'obiettivo è quello di attribuire alla geometria ancora indeformata del modello in esame una iniziale distribuzione tensionale di equilibrio che sia compatibile con le condizioni poste al modello stesso.

Per ottenere, dunque, deformazioni trascurabili, riferibili alle dimensioni del modello costituito, si può procedere in due modi, del tutto equivalenti:

- adottando un modello elastico e, successivamente, al raggiungimento di un primo equilibrio elastico, facendo riequilibrare il sistema con il modello costitutivo corretto (equilibrio plastico);
- facendo raggiungere al sistema un primo equilibrio elastico aumentando in modo fittizio alcuni parametri a rottura (tension cut-off e coesione) di modo che nel sistema avvengono deformazioni nel campo elastico. Successivamente al raggiungimento di un primo equilibrio elastico, il modello sarà riequilibrato, attribuendo questa volta i parametri reali, propri dei terreni, per far trovare l'equilibrio plastico definitivo.

Il raggiungimento di condizioni di equilibrio è stato valutato mediante l'osservazione della diminuzione della massima forza non bilanciata al valore di 100 N e la cessazione nel modello degli spostamenti sia verticali sia orizzontali.

Le condizioni con filtrazione sono state simulate sottoponendo il modello all'azione della gravità con parametri propri dei terreni considerati e riproducendo un flusso d'acqua nel terreno. A tale scopo sono state introdotte proprietà idrauliche per i materiali presenti nel modello e proprietà fisiche e meccaniche dell'acqua in parte con valori fittizi, scelti sotto consiglio del manuale d'uso, in modo da velocizzare la soluzione del programma.

Tale accorgimento, del resto non introduce variazione nei risultati finché sono simulate condizioni drenate nelle quali è consentito il completo smaltimento di eventuali sovrappressioni neutre. In ogni caso, anche in questa fase si è cercato di far riferimento a dati reali provenienti sia dalla letteratura sia dalle indagini ed elaborazioni riportate nel capitolo precedente.

Prima di far giungere il modello all'equilibrio elastico, è necessario che nel sistema sia raggiunto un equilibrio di solo flusso, impedendo la risposta meccanica del materiale (disaccoppiamento del flusso dalle deformazioni meccaniche); così facendo le pressioni neutre di filtrazione vengono calcolate prima di far raggiungere al modello l'equilibrio elastico e quindi plastico con soluzione accoppiata del flusso e delle deformazioni meccaniche, ovvero prima che sia ricostruito il campo delle tensioni efficaci all'interno del materiale. Poiché in queste ultime due fasi continua ad essere consentito il flusso, non possono generarsi sovrappressioni neutre come conseguenza delle deformazioni del materiale. Il raggiungimento delle condizioni di equilibrio di solo flusso è stato verificato utilizzando un programma scritto in FISH che consente di definire le funzioni INFLOW= flusso entrante e OUTFLOW= flusso uscente. Si può dunque, ritenere condizione necessaria e sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio di solo flusso una differenza INFLOW-OUTFLOW trascurabile, in pratica che non superi un ordine di grandezza; invece, condizione necessaria ma non sufficiente al raggiungimento del medesimo equilibrio è che le pressioni di poro abbiano raggiunto valori costanti.

Tutte le simulazioni numeriche sono state effettuate adottando un modello costitutivo Mohr-Coulomb, che prevede l'assegnazione delle seguenti proprietà ai materiali:

- **modulo di bulk** (*bulk modulus, in Pa*) : è stato calcolato con la seguente relazione:

Eq. 12 
$$B = \frac{E}{3 \times (1 - 2\nu)}$$

dove  $E$  = modulo di Young del terreno e  $\nu$  = coefficiente di Poisson;

- **modulo di taglio** (*shear modulus, in Pa*) : è stato calcolato con la seguente relazione:

Eq. 13 
$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)}$$

dove  $E$  = modulo di Young del terreno e  $\nu$  = coefficiente di Poisson;

- **densità  $\gamma$**  (*density, in Kg/m<sup>3</sup>*): nelle analisi statiche senza flusso è stata utilizzata la densità del materiale saturo solamente per le argille, mentre si è considerata la densità secca per tutti gli altri materiali. Nelle analisi con filtrazione, invece, è stata utilizzata la densità secca per tutti i materiali poiché in *groundwater configuration* FLAC calcola automaticamente la densità saturo dei materiali a partire dalla densità nota dell'acqua e dai parametri idraulici assegnati, porosità e permeabilità e pertanto, la densità degli elementi varierà al muoversi della superficie freatica;

- **coesione  $c$**  (*cohesion, in Pa*);
- **coesione residua  $c_r$**  (*in Pa*);
- **angolo di attrito  $\phi$**  (*friction, in gradi*);
- **angolo di attrito residuo  $\phi_r$**  (*in gradi*);
- **tension cut-off** (*in Pa*): rappresenta il valore del minimo sforzo principale a trazione che può sopportare un materiale senza giungere a rottura. Per le terre tale valore si può ricavare in base all'involuppo lineare di Mohr-Coulomb ( $\tau = c + \sigma \times tg\psi$ ) come intersezione tra l'involuppo e l'asse delle ascisse (ovvero delle  $\sigma$ ), secondo la seguente equazione:

Eq. 14 
$$\sigma_\tau = \frac{c}{tg\psi} = \text{tension cut - off}$$

- **angolo di dilatanza  $dil$**  (*dilation angle, in gradi*): la dilatanza è il cambiamento di volume che si presenta con la distorsione per taglio di un materiale. Tale proprietà è rappresentata dall'*angolo di dilatanza*, definito in base ai risultati delle prove di rottura come l'angolo formato dalla curva di variazione relativa di volume (*volumetric strain  $\Delta V/V$* ) in funzione della deformazione assiale relativa (*strain,  $\epsilon$* ) quando il materiale si trova nel campo plastico.

- **angolo di dilatanza residuo  $dil_r$**  (*in gradi*).

Per la simulazione delle condizioni di flusso nel terreno sono state attribuite ai materiali dei modelli proprietà aggiuntive:

- **permeabilità** (*permeability, in m<sup>3</sup> x s/kg*): il programma definisce la permeabilità come:

Eq. 15 
$$K = \frac{k}{g\rho_w} \cong k \cdot 1.02 \times 10^{-6}$$

dove  $k$ =coefficiente di permeabilità in  $m/s$ ,  $g$ =accelerazione di gravità in  $m/s^2$ ,  
 $\rho_w$ =densità dell'acqua in  $kg/m^3$ ;

- **porosità  $n$**  (porosity, in percentuale);
- **modulo di bulk dell'acqua** (in Pa): equivale all'inverso della compressibilità dell'acqua ( $C_w$ );
- **densità dell'acqua** (in  $kg / m^3$ ).

Nella simulazione di sistemi che contengono una superficie freatica (*groundwater configuration*), sono stati attribuiti i seguenti valori ai parametri dell'acqua:

- Bulk =  $2.00 \times 10^9$  Pa
- Densità =  $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$

Seguendo il consiglio del manuale d'uso del programma, inoltre, è stato attribuito un valore fittizio di tension cut-off esageratamente elevato per conferire al liquido un comportamento perfettamente elastico, ed è stato utilizzato un valore ridotto del modulo di bulk per favorire la soluzione accoppiata, meccanica flusso, senza con ciò influire sul risultato numerico essendo simulate condizioni idrauliche drenate.

I parametri di resistenza (angolo di attrito, coesione, angolo di dilatanza) e le proprietà idrauliche (porosità, permeabilità) sono state diversificate solo in base alle litologie. I parametri di deformabilità (moduli elastici) sono stati invece variati in modo discreto con il confinamento e dunque con la profondità.

A tale scopo pur non essendo disponibili valori diretti di  $E$  alle diverse profondità (da prove in situ) né curve tensio-deformative ottenute da prove triassiali di laboratorio a diversi livelli di confinamento, è stata utilizzata una relazione empirica, valida per le terre, proposta sul manuale d'uso del programma nella forma:

$$\text{Eq. 16} \quad E = E_0 \cdot \left( \frac{\sigma_{h0}}{\sigma_{atm}} \right) = E_0 \cdot \left( \frac{\sigma_{v0} K_0}{\sigma_{atm}} \right)^\alpha$$

- dove
- $E_0$  = modulo di Young alla compressione semplice,
  - $\sigma_{h0}$  = pressione laterale in situ,
  - $\sigma_{atm}$  = pressione atmosferica,
  - $\sigma_{v0}$  = pressione verticale in situ,
  - $K_0$  = coefficiente di spinta a riposo,
  - $\alpha$  = coefficiente funzione del materiale.

I valori attribuiti ai parametri sono stati ricavati da pubblicazioni specifiche.

Lo studio è stato condotto, quindi, introducendo nei modelli i valori di resistenza e compressibilità misurati in prove di laboratorio: laddove presenti maggiori incertezze sulla scelta dei valori da attribuire ai parametri sono stati adottati i valori più conservativi in modo da effettuare le analisi numeriche comunque a vantaggio della sicurezza.

Per la simulazione di tutti i corpi geologici con il codice di calcolo FLAC è stato adottato un criterio di continuità della massa giustificato dalla natura dei materiali trattati (argille e detriti di frana) assimilabile a quella di "terre" e dalla presenza di materiali sabbiosi a comportamento relativamente più rigido.

Il criterio della continuità del mezzo consente di sfruttare al meglio le possibilità risolutive di FLAC nato, per l'appunto, per simulare il comportamento meccanico di mezzi continui.

L'aver messo a contatto direttamente mezzi diversi senza creare "interfacce" di discontinuità ha consentito al programma di considerare una graduale variazione delle proprietà dei materiali a contatto simulando una fascia con graduale transizione di comportamento tra terre di diversa natura (sabbie-argille; sabbie-detrito; argille-detrito).

I paragrafi che seguono riportano le analisi condotte su tre versanti instabili delle aree "campione". Al fine di mostrare i *meccanismi* che si sono sviluppati nel corso delle simulazioni, sono stati presi in considerazione gli indicatori plastici. Tali indicatori mostrano quelle zone in cui le tensioni sono state tali da raggiungere lo snervamento. Una tale indicazione di solito denota che si sta presentando una condizione di flusso plastico, ma è possibile per un elemento semplicemente "toccare" la superficie di snervamento senza che abbia luogo un qualsiasi flusso significativo. È importante guardare all'intero schema degli indicatori di plasticità per vedere se si è sviluppato un *meccanismo* di rottura. L'insorgere della rottura è indicato dalla presenza di una linea continua di separazione tra zone in rottura e zone in equilibrio elastico.

### 3.4 Il versante di San Donato (Pisticci)

Allo scopo di simulare le condizioni di instabilità dell'area franosa di San Donato è stato considerato il profilo geologico del versante nel 1967 (fig. 58), elaborato sulla base dei dati dell'analisi delle foto aeree (anno 1967) e della documentazione proveniente dall'analisi storica.

La scelta della traccia del profilo è stata guidata dalla presenza degli eventi franosi del '72-'73 e dalla disponibilità di informazioni. A questo proposito si è ritenuto opportuno utilizzare la topografia precedente agli eventi di frana proprio con l'obiettivo di simulare ciò che è realmente accaduto (*back analysis*) al fine di testare le potenzialità di tale procedura di calcolo.

In base alla configurazione geologica del versante è stata scelta una dimensione delle celle pari a 4 m di lato.

Di seguito sono riportati i valori delle proprietà dei singoli materiali considerati nella simulazione.

LITOTIPO ARGILLOSO. Si sono considerate omogenee le proprietà utilizzate per le Argille nei modelli simulati con FLAC:

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K_0$	$c$	$c_r$	$\phi$
$2.4 \times 10^7$	0.25	1	2	$4 \times 10^4$	0	$24^\circ$
$\phi_r$	$dil$	$dil_r$	$\gamma_{dry}$	$\gamma_{sat}$	$n$	$K$
$17^\circ$	$15^\circ$	$0^\circ$	1500	2000	50	$10^{-15}$

LITOTIPO SABBIOSO. È costituito in massima parte da sabbia e ghiaia con percentuale variabile della frazione limosa. In base ai dati a disposizione si può affermare che il litotipo in esame mostra elevata eterogeneità granulometrica e caratteristiche fisiche e meccaniche molto variabili. Il comportamento meccanico del litotipo sabbioso è stato considerato più simile a quello di materiali litoidi che a quello delle terre sciolte per la presenza di livelli ben cementati che permettono la presenza di una scarpata subverticale.

I valori attribuiti ai parametri utilizzati per le simulazioni sono:

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K_0$	$c$	$c_r$	$\phi$
$4 \times 10^{10}$	0.3	1	-	$10^2$	0	$34^\circ$
$\phi_r$	$dil$	$dil_r$	$\gamma_{dry}$	$\gamma_{sat}$	$n$	$K$
$32^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	1800	2100	30	$10^{-9}$

DETRITI DI FRANA A COMPONENTE PREVALENTEMENTE ARGILLOSO-LIMOSA. A seguito della loro genesi e messa in posto, sono stati attribuiti parametri simili a quelli delle Argille grigio-azzurre:

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K_0$	$c$	$c_r$	$\phi$
$1.86 \times 10^8$	0.2	1	2	$4 \times 10^4$	0	$25^\circ$
$\phi_r$	$dil$	$dil_r$	$\gamma_{dry}$	$\gamma_{sat}$	$n$	$K$
$18^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	1500	1900	40	$10^{-14}$

In assenza di flusso il modello ha raggiunto una condizione di equilibrio verificata dall'andamento della *unbalanced force* (fig. 59) e degli spostamenti misurati in tre punti posti sulla superficie del profilo da monte a valle (fig. 60, ubicazione in fig. 58).

È interessante osservare come sia trascurabile l'entità di tali spostamenti (dell'ordine di  $10^{-1}$  metri) rispetto alle dimensioni del modello simulato (dell'ordine di  $10^2$  metri) e come, nella condizione di equilibrio plastico in assenza di flusso, siano individuabili zone e punti isolati in cui il materiale risulta entrato in uno stato di "plasticizzazione". L'osservazione dei diagrammi riportati in figura 60 offre un'idea della deformazione subita dai punti "monitorati" all'interno del modello: risalta, infatti, la differenza di comportamento del punto  $i = 154$  e  $j = 32$ , appartenente alla massa detritica che subisce la massima deformazione, rispetto agli altri in equilibrio.

La distribuzione di tali zone "plasticizzate" lascia intravedere nel settore di valle una fascia relativamente superficiale di "plasticizzazione" (fig. 61). Il fenomeno interessa la zona che, in superficie, ospita il corpo di frana e si configura come un processo prevalentemente traslativo con scollamento relativamente superficiale (fig. 62) in corrispondenza della testata del fosso.

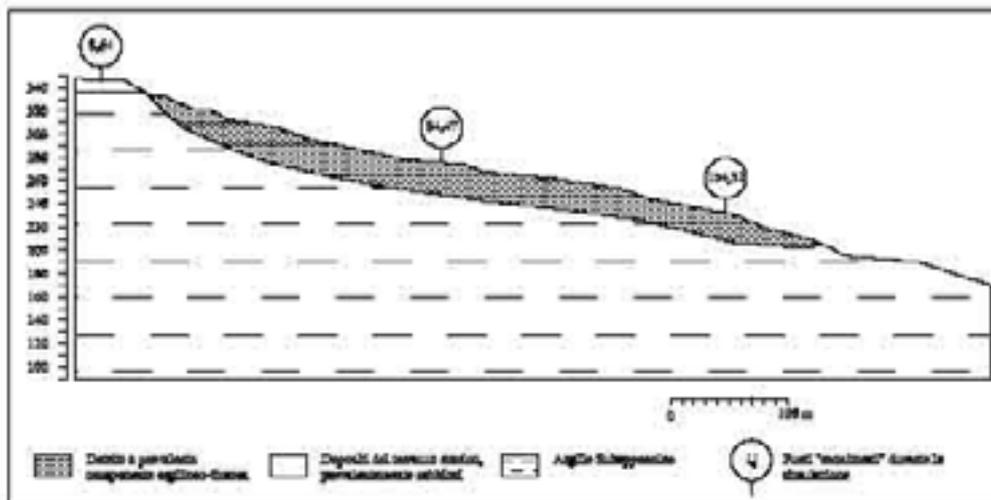


Figura 58. Sezione geologica utilizzata nella simulazione numerica (traccia A-B in fig. 23) e ubicazione dei punti "monitorati".

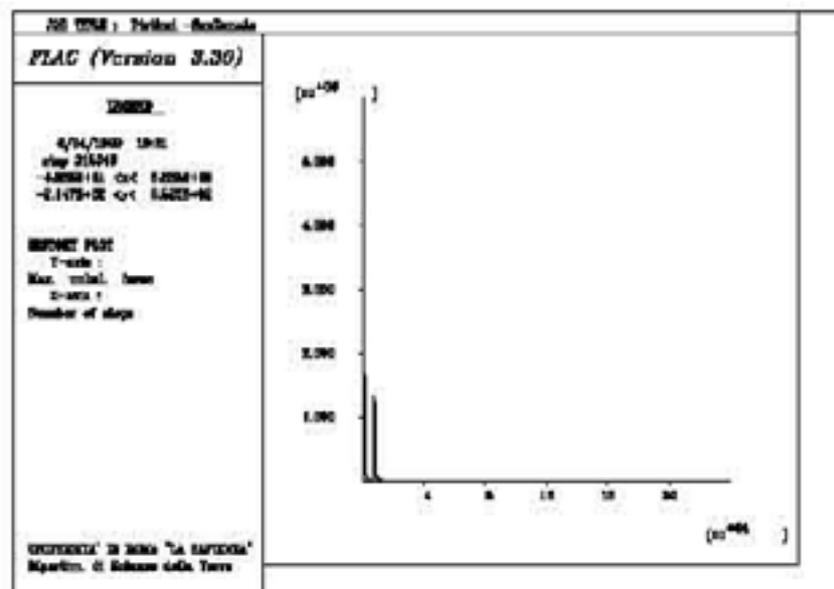


Figura 59. Andamento della "unbalanced force" che indica il raggiungimento dell'equilibrio plastico in assenza di flusso.

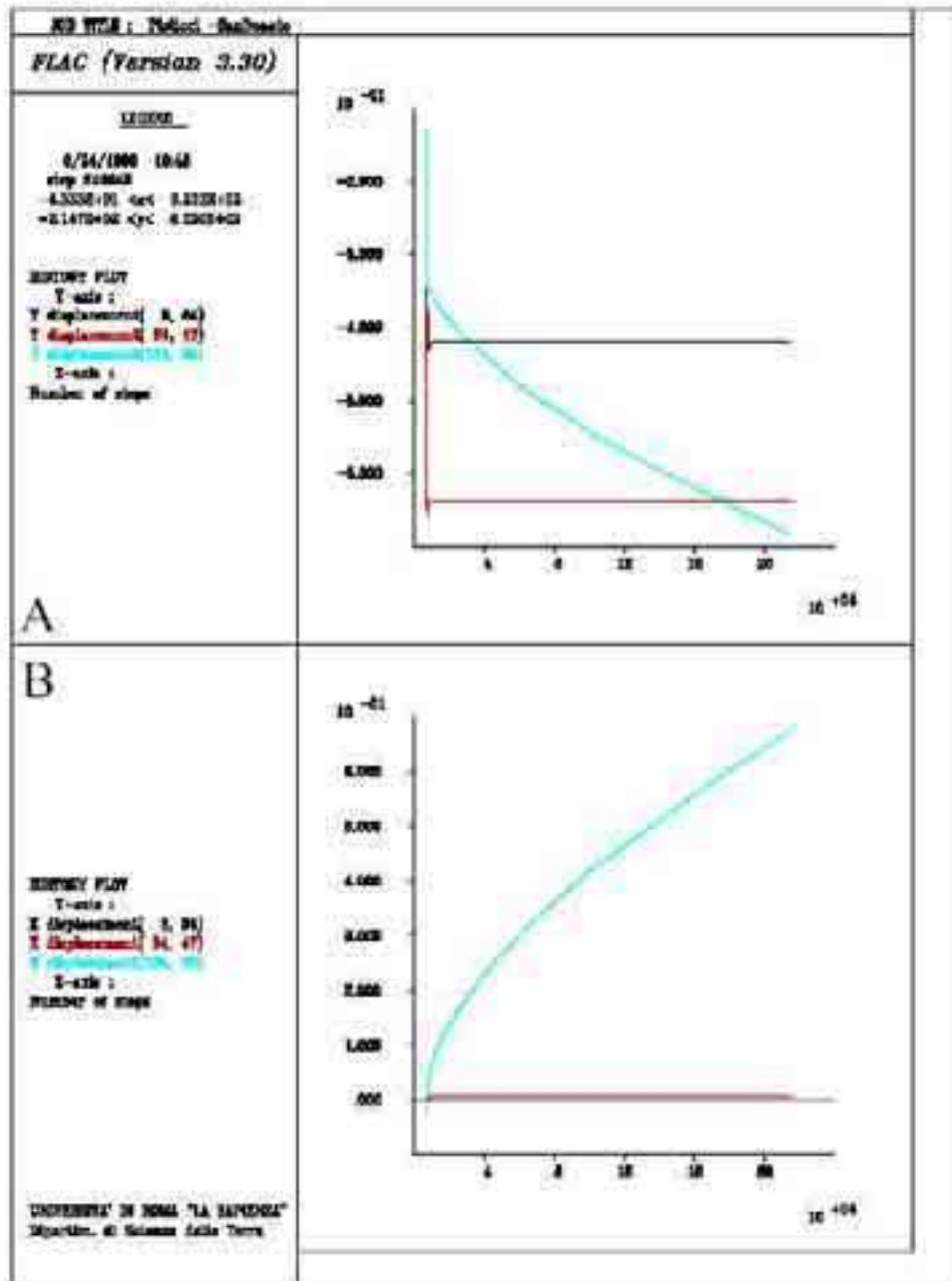


Figura 60. Modello in assenza di flusso; andamento degli spostamenti verticali (A) e orizzontali (B) in tre punti sulla superficie del modello da monte a valle (rispettivamente 8,64; 64,47; 154,32; ubicazione in fig. 58) durante il raggiungimento dell'equilibrio plastico.

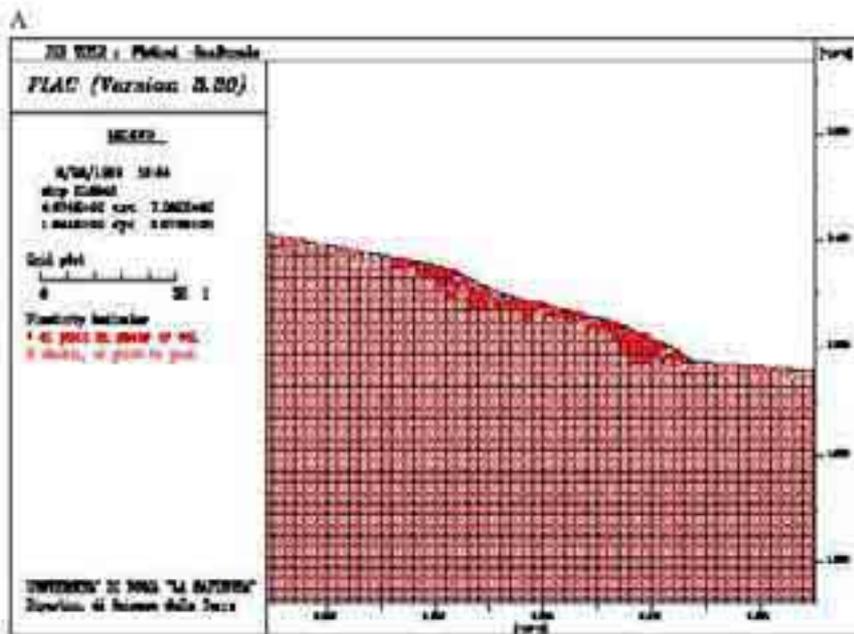
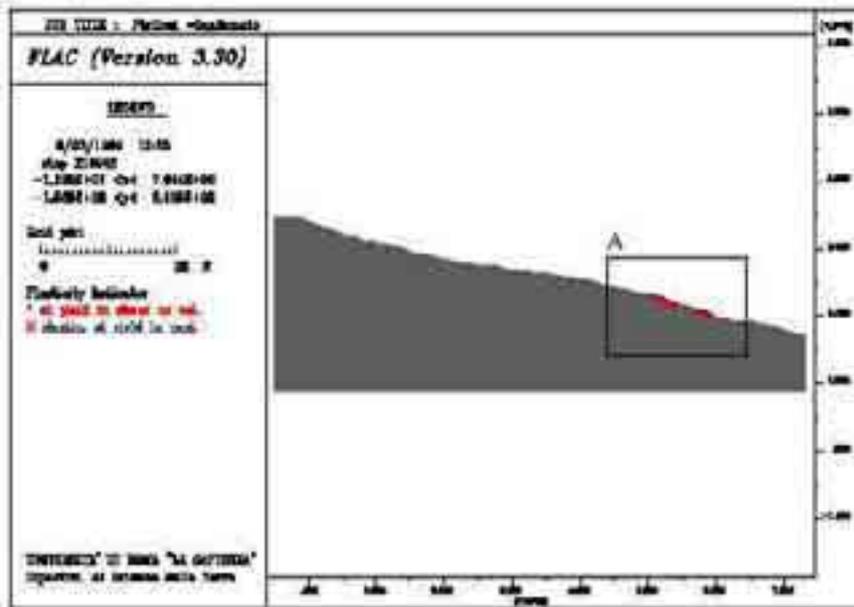


Figura 61: Punti di plasticizzazione.

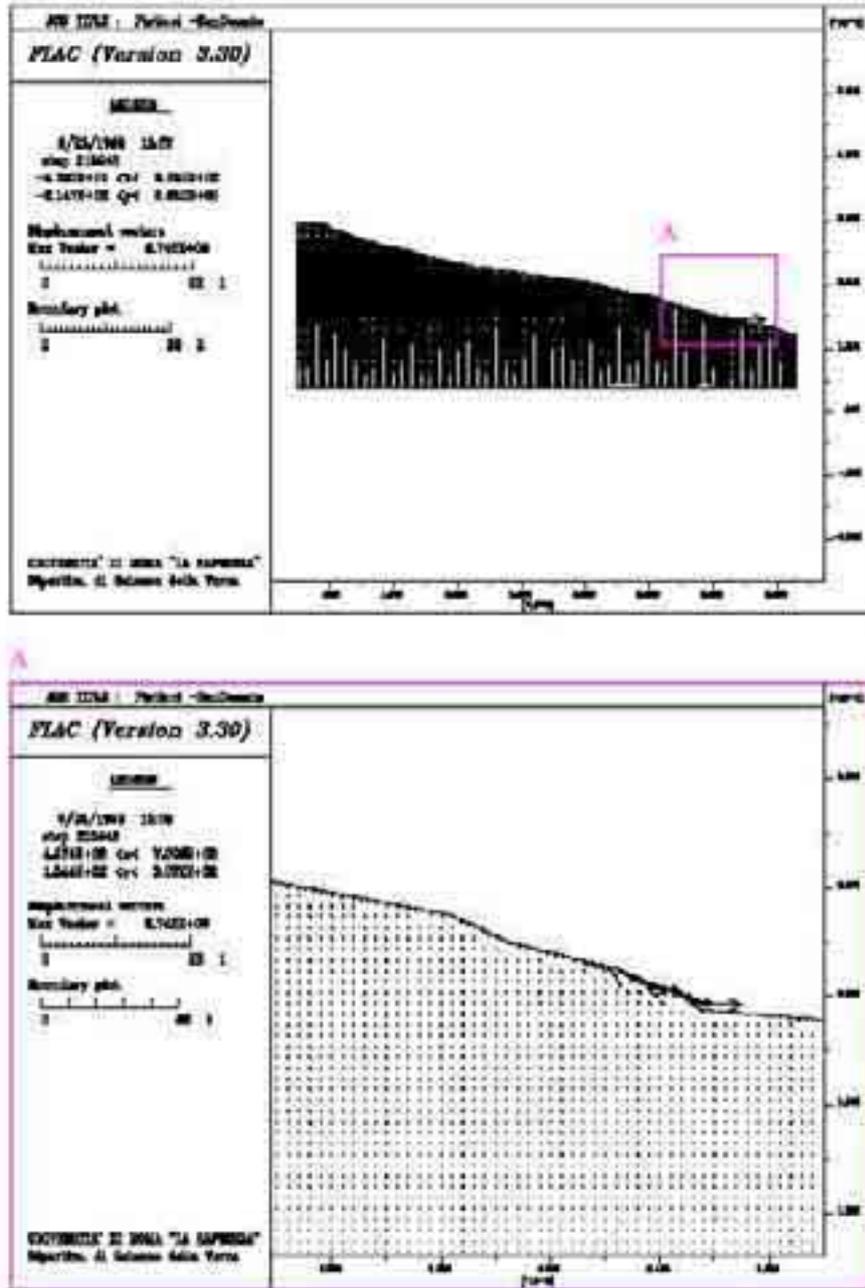


Figura 62. Modello in assenza di flussor vettori spostamento.

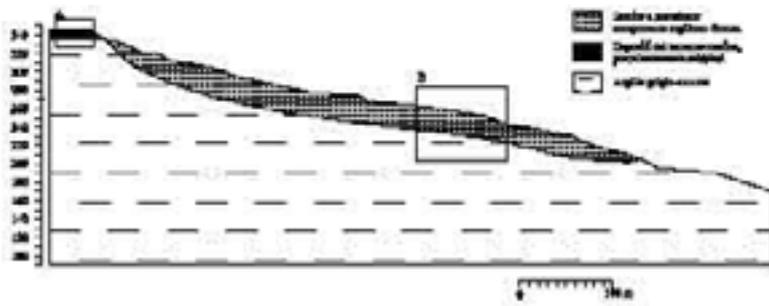
Sulla base degli elementi di idrogeologia ricavabili dai dati di letteratura, dalla documentazione storico - scientifica e dalle osservazioni dirette, sono state successivamente ipotizzate 3 condizioni di flusso corrispondenti ad altrettanti livelli di falda nel sottosuolo (fig. 63):

- Caso 1. Falda a 5 m di profondità nei depositi sommitali (fig. 64).
- Caso 2. Falda a quota iniziale 336 m s.l.m., in corrispondenza del contatto tra i depositi sommitali e le Argille grigio-azzurre (*condizioni ordinarie*): a tale condizione corrisponde un livello di falda nei detriti a circa 8 m dal p.c. (fig. 65).
- Caso 3. Falda situata al disotto della superficie di scivolamento ipotizzata per San Donato (fig. 66).

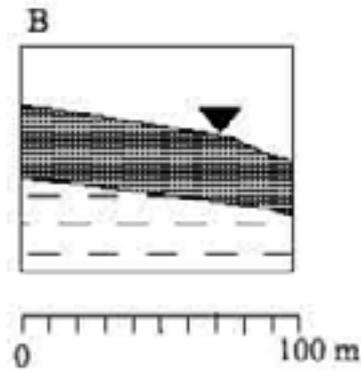
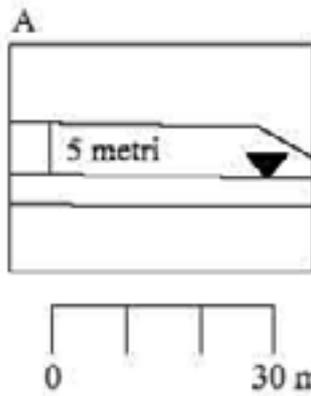
Nella prima ipotesi si è considerata la presenza di una sorgente al contatto tra i depositi del terrazzo marino e le Argille Subappennine; nella seconda ipotesi, invece, il livello di falda è stato posizionato al di sotto di tale emergenza. L'ultima condizione corrisponde, invece, all'effetto determinato da una lunga stagione asciutta. Le altezze di falda sono state simulate in base ai dati bibliografici ed alle osservazioni condotte durante la campagna di monitoraggio delle sorgenti della collina di Pisticci (vedi prf. 2.3). Le portate registrate nel semestre invernale sono dell'ordine di  $\cong 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  mentre risultano nulle nei mesi estivi. Di contro, come più volte evidenziato (vedi prf. 2.3), all'interno della coltre detritica la circolazione idrica è risultata continua anche nei mesi di deficit idrico. Da qui la scelta di approntare due modelli con differenti quote piezometriche: una relativa ad i mesi di surplus idrico con una sorgente (fig. 64) al contatto tra le sabbie del terrazzo marino e le Argille, l'altra, considerata "ordinaria", caratterizzata dalla circolazione d'acqua all'interno del solo detrito di frana (circa 8 metri dal piano campagna).

Il valore di portata calcolato da FLAC ( $0.75\text{e-}6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) coincide con l'effettiva misura di campagna convalidando la scelta del modello di flusso simulato nel caso 1.

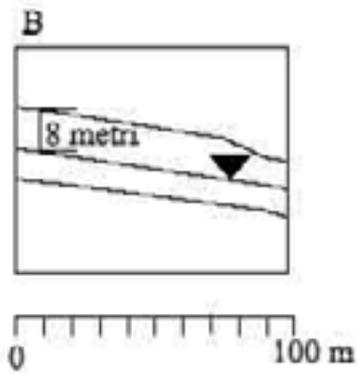
La scelta di simulare, in tutte le ipotesi di flusso proposte, una condizione di filtrazione profonda è stata guidata sia dall'intenzione di ricreare ipotesi peggiorative per la stabilità del sistema sia dall'insufficienza di dati idrogeologici locali necessari per poter differenziare in modo attendibile le condizioni di filtrazione con la profondità. In ogni caso il programma di calcolo non permette la simulazione di una falda sospesa contenuta nel detrito, ciononostante la scelta adottata nella simulazione del flusso è



CASO 1



CASO 2



CASO 3

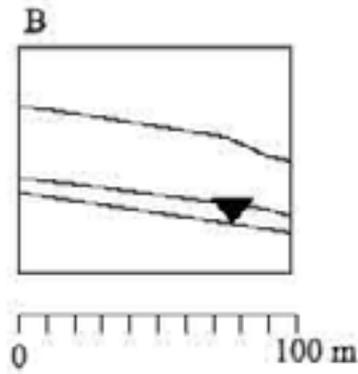


Figura 63. Livelli di falda ipotizzati nella modellazione.

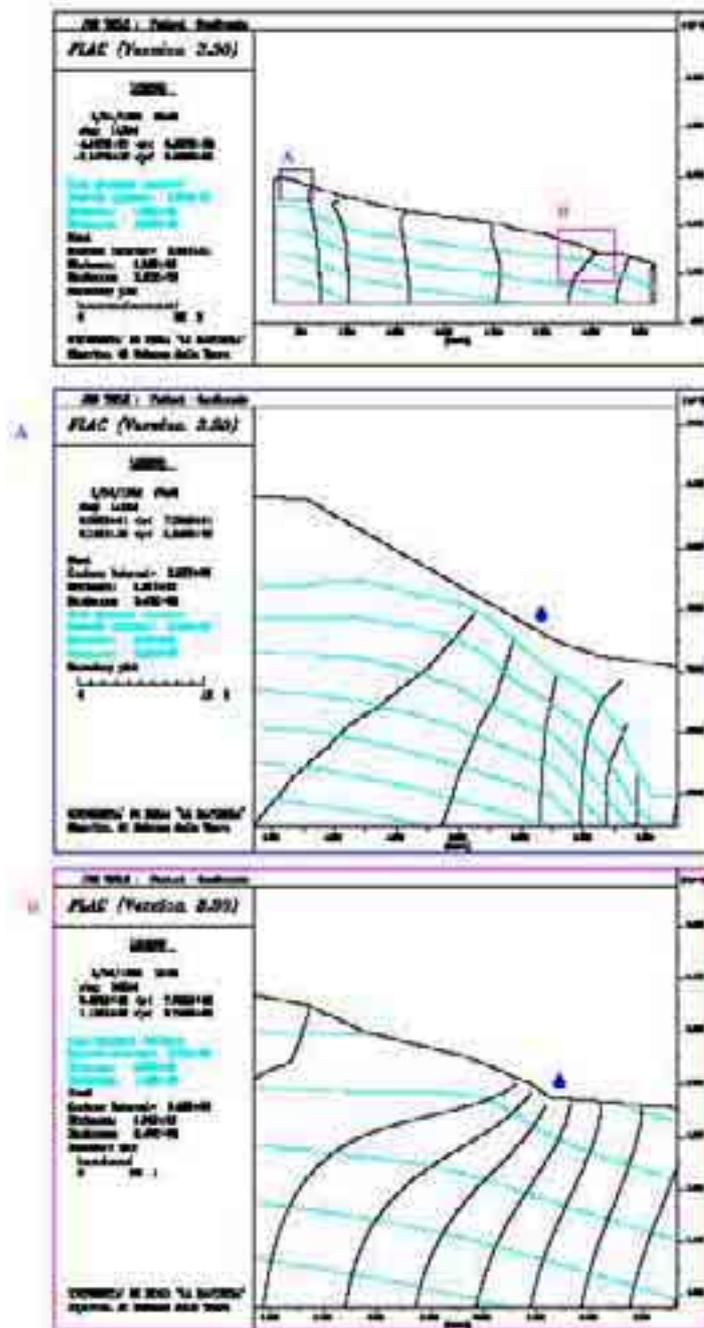


Figura 64. Caso1: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali.

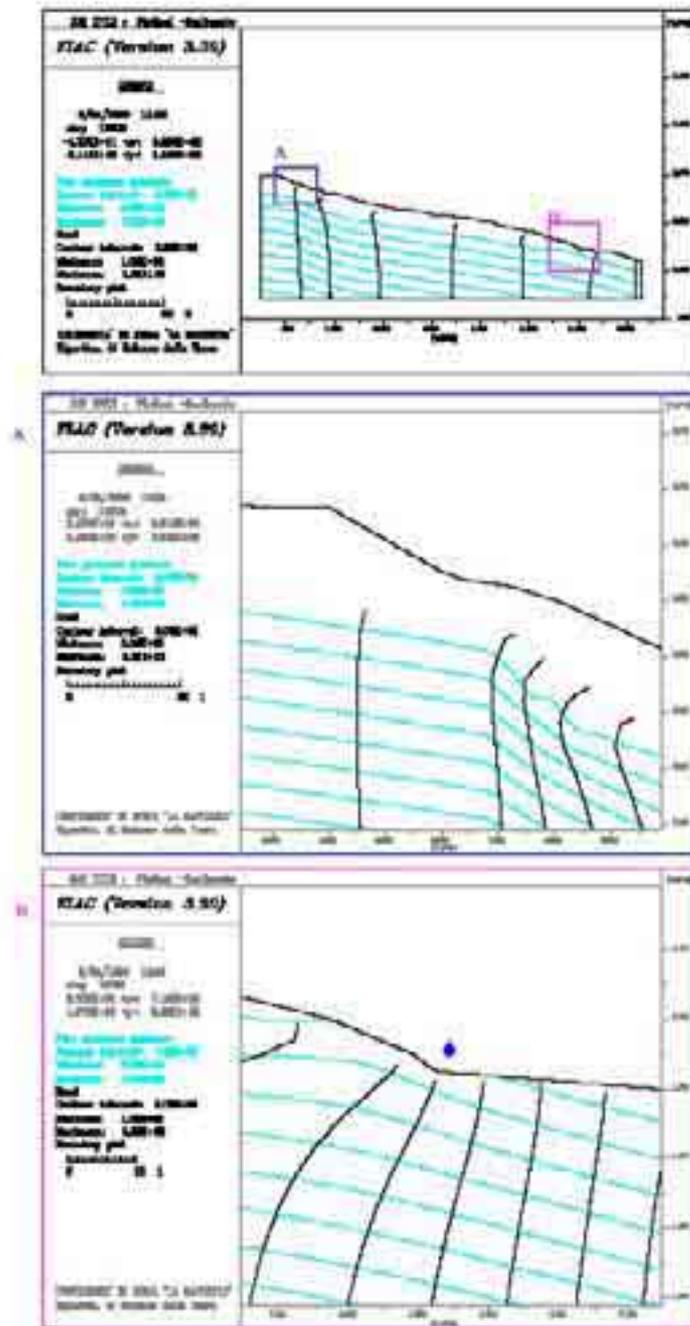


Figura 65. Caso 2: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali.

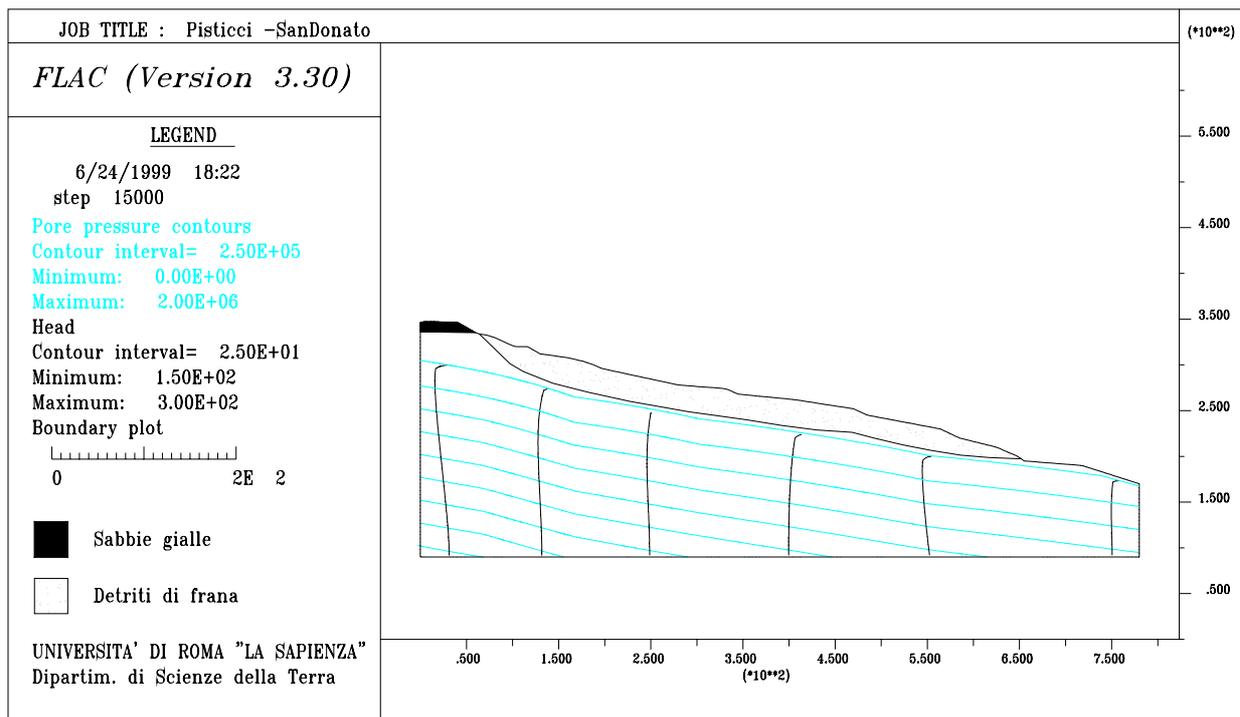


Figura 66. Caso 3: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali.

stata confortata dai risultati ottenuti nei quali risulta comunque evidente la maggiore entità degli effetti prodotti dalla filtrazione in superficie.

Per ogni ipotesi di filtrazione nel sistema inizialmente è stato raggiunto un equilibrio di solo flusso, verificato controllando l'andamento delle funzioni OUTFLOW ed INFLOW (figg. 64, 65, 66, 67, 68 e 69).

Nei casi 1 e 2 le ipotesi di filtrazione non consentono al sistema il raggiungimento dell'equilibrio: nel settore vallivo del pendio (figg. 70 e 71) si innesca un esteso dissesto, analogamente a quanto già osservato nel fenomeno di collasso prodotto a partire dalle condizioni in assenza di flusso (fig. 61) o con falda al di sotto della superficie di scorrimento (fig. 74). Il fenomeno di instabilità si presenta con un meccanismo di scorrimento superficiale con componenti prevalentemente traslative che tende a coinvolgere una porzione significativa del pendio.

Inoltre, nel caso 1, si ha l'attivazione di un fenomeno di frana per scorrimento rotazionale relativamente profondo nel settore di monte (fig. 70) che, al momento del collasso del sistema dovuto al movimento traslazionale nella zona medio-bassa del pendio, non è completamente definibile ma deducibile dalla forma della zona di "plasticizzazione". Per mettere in evidenza tale meccanismo di frana sono riportati i diagrammi relativi agli spostamenti verticali ed orizzontali subiti dai punti "monitorati" (fig. 58) nella piastra in sabbia (punto  $i = 9$  e  $j = 64$ ) e nelle sottostanti Argille (punti  $i = 2$ ,

5, 9, 13 e  $j = 61$ ) (figg. 72 e 73). Il punto relativo alle sabbie ( $i = 9$  e  $j = 64$ ) subisce uno spostamento in  $y$  mentre non è soggetto a variazioni nella direzione  $x$ ; diversamente i punti "monitorati" all'interno delle Argille si muovono in entrambe le direzioni.

I risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il codice di calcolo FLAC sono esattamente confrontabili con i fenomeni di frana rotazionale e traslazionale individuati nel settore di San Donato sulla base sia del rilevamento di campagna sia del fotorilevamento e anche dai dati disponibili in letteratura (vedi prf. 2.3).

I risultati delle simulazioni appaiono coerenti con l'esistenza di un meccanismo di scorrimento prevalentemente traslativo nella zona medio - bassa del pendio il quale induce instabilità per scorrimento rotazionale in corrispondenza della parte alta del versante. Le simulazioni in presenza di flusso hanno consentito di valutare l'azione destabilizzante prodotta dalla filtrazione. In particolare, gli effetti peggiorativi interessano direttamente i fenomeni superficiali nel settore di valle e solo indirettamente nel settore di monte.

Dalle simulazioni effettuate con FLAC risulta comunque evidente il diverso grado di stabilità presentato dai fenomeni di dissesto che tendono ad innescarsi a monte ed a valle del versante, essenzialmente in funzione della loro diversa caratterizzazione. Infatti il dissesto gravitativo di monte presenta in generale un maggior grado di stabilità rivelandosi di più difficile attivazione e determinando, in ogni caso, spostamenti sensibilmente minori e più lenti rispetto al dissesto più superficiale e localizzato di valle.

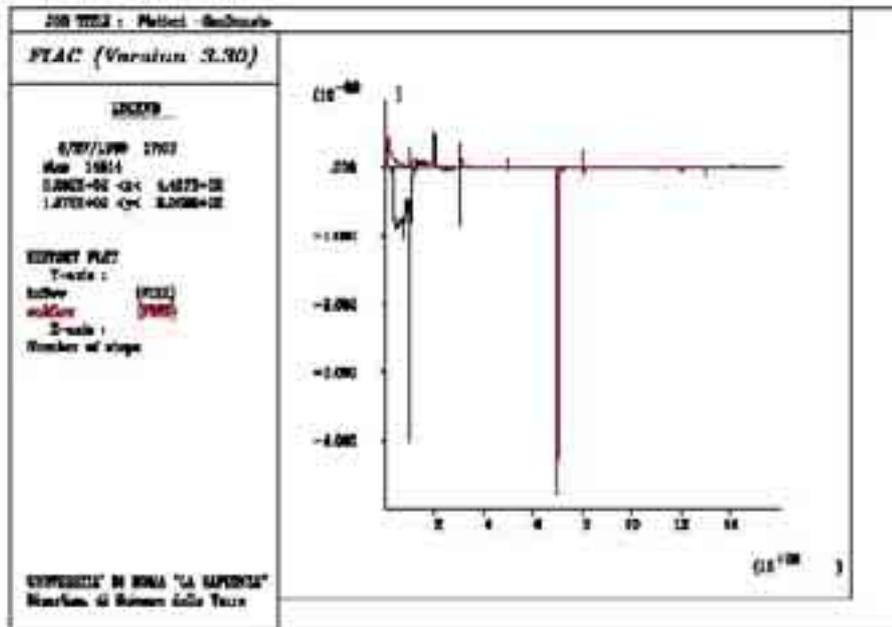


Figura 67. Caso 1: andamento inflow - outflow.

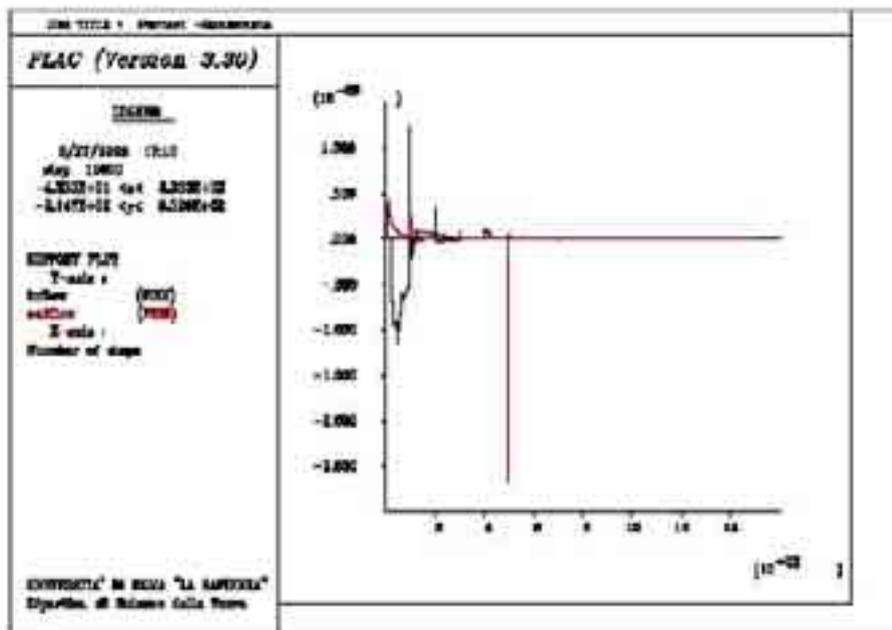


Figura 68. Caso 2: andamento inflow - outflow.

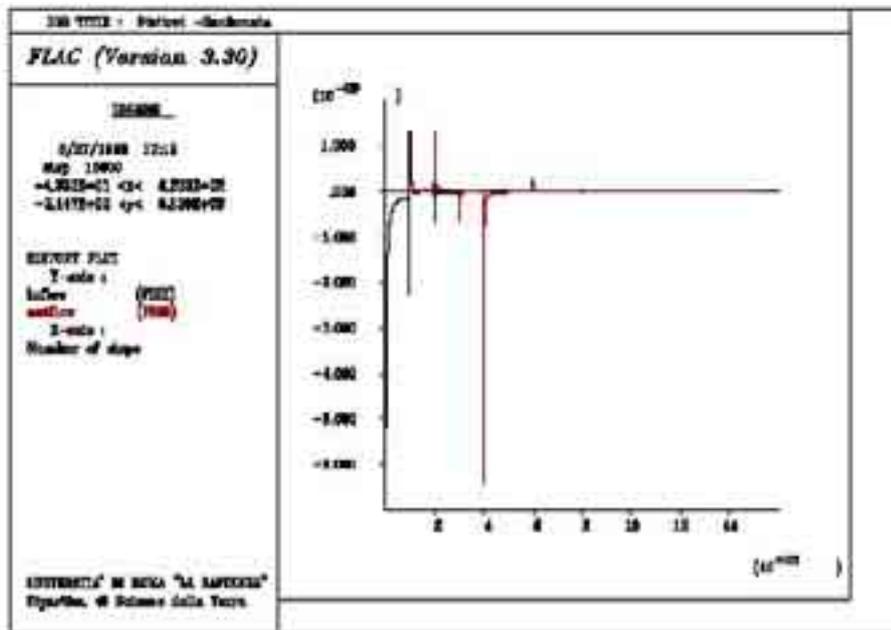


Figura 69. Caso 3: andamento inflow - outflow.

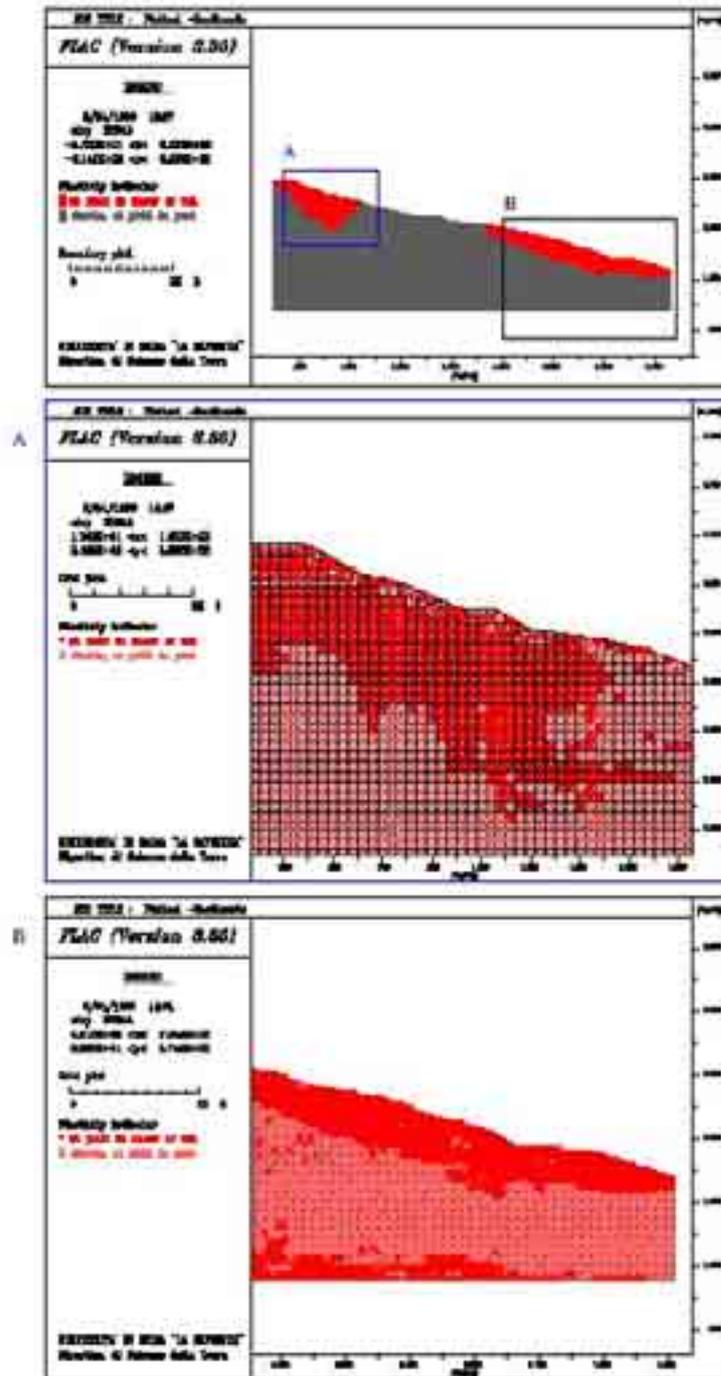


Figura 70. Caso 1; punti di plasticizzazione.

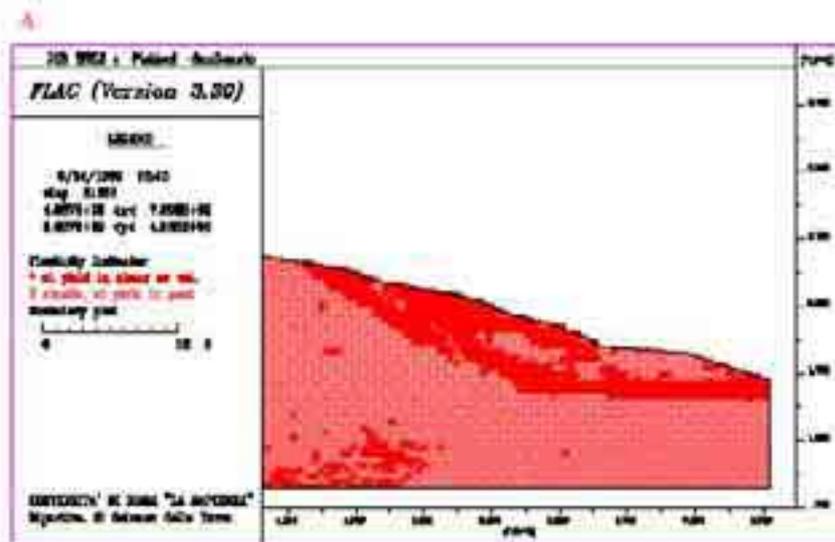
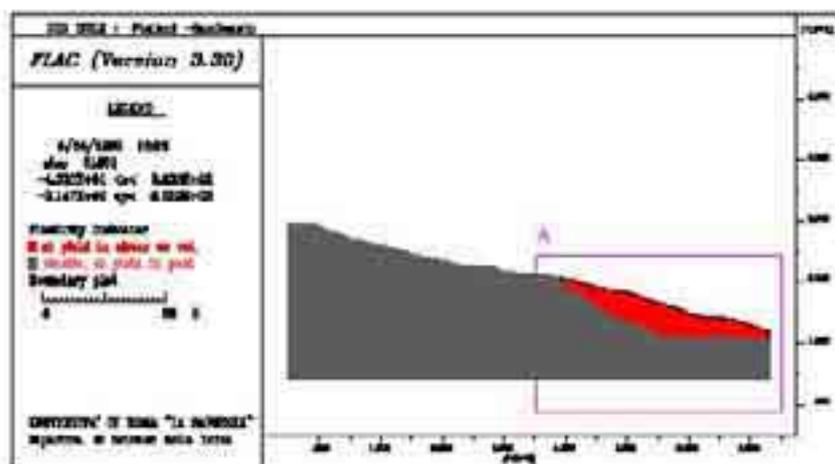


Figura 71: Caso 2; punti di plasticizzazioni.

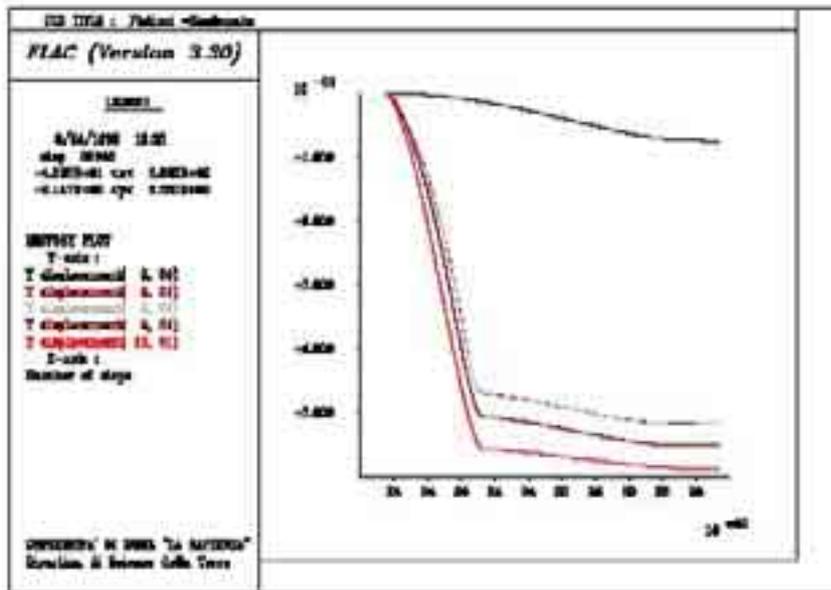


Figura 72. Caso 1: andamento degli spostamenti verticali in punti al contatto tra i depositi sommitali e le Argille.

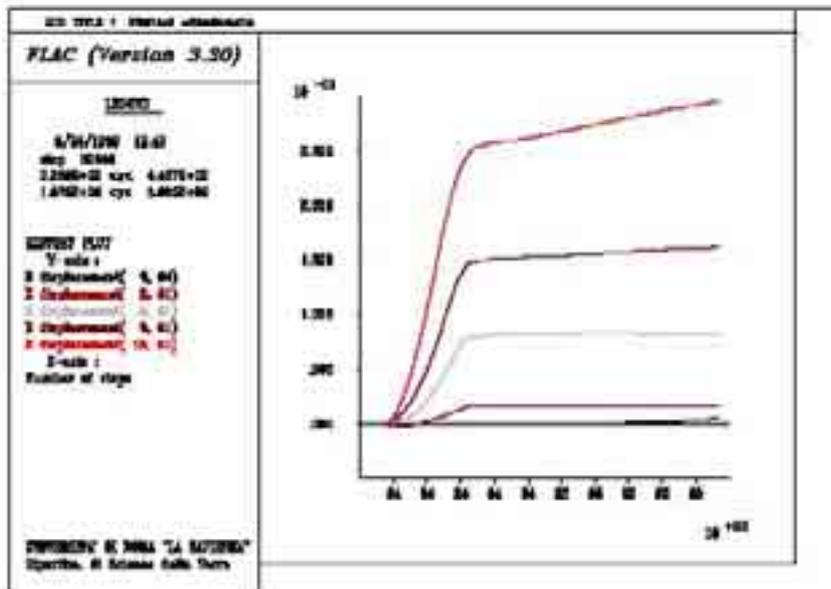


Figura 73. Caso 1: andamento degli spostamenti orizzontali in punti al contatto tra i depositi sommitali e le Argille.

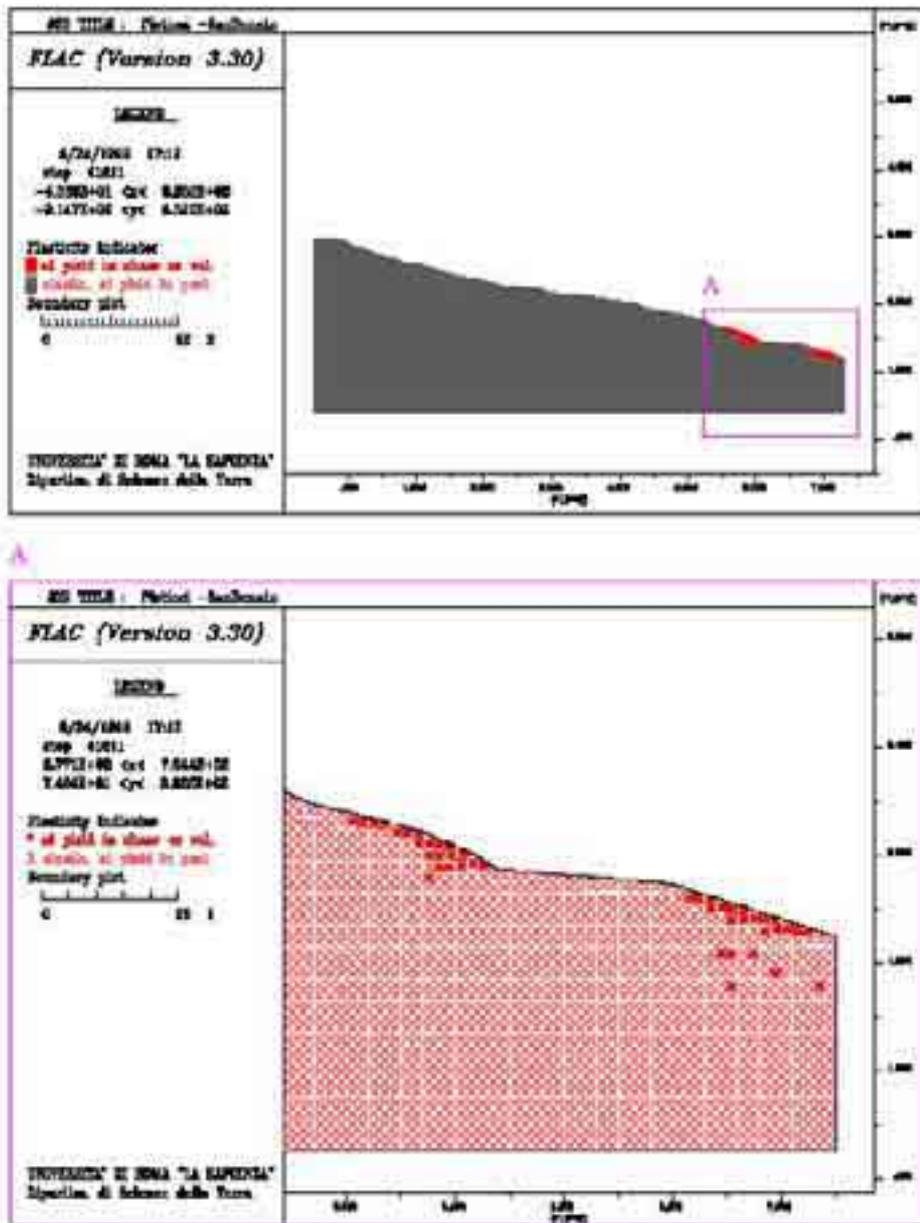


Figura 74. Caso 3: punti di plasticizzazioni.

### 3.4.1 Analisi di stabilità' con i metodi dell'equilibrio limite globale

Di seguito sono state riportate le analisi di stabilità dei pendii eseguite da Guerricchio & Melidoro per la collina di Pisticci in rapporto ai seguenti fattori: geometria del pendio; posizione della falda; caratteristiche geotecniche; esistenza di precedenti superfici di scorrimento. Le due sezioni analizzate dagli Autori (figura 75) sono rappresentative della parte ovest (A) e centrale (B) della collina (fig. 23). Per ciascuna sezione gli Autori hanno considerato tre ipotetiche superfici di scorrimento, scelte in base sia alle evidenze del rilievo di superficie sia in base ai risultati dei sondaggi sia ancora ai calcoli preliminari fatti per individuare le configurazioni più critiche.

Il metodo adottato è quello di Sarma (1973) che adotta una superficie di scorrimento non circolare. Le verifiche sono state effettuate in termini di tensioni effettive, con tre diverse assunzioni circa il regime delle pressioni neutre nel pendio:

- a) superficie piezometrica coincidente con il piano campagna;
- b) superficie piezometrica corrispondente alle determinazioni eseguite in sito dagli Autori con i piezometri installati;
- c) superficie piezometrica posta a profondità maggiore di quella della superficie di scivolamento.

Per quanto riguarda le proprietà dei terreni, le verifiche sono state condotte assumendo, per i terreni argillosi,  $\gamma_{\text{sat}} = 2.05 \text{ t/m}^3$  ed i valori medi di resistenza riportati in tabella 9, alternativamente di picco e residui. I valori di resistenza di picco sono stati assunti per caratterizzare un evento franoso che si verifichi per la prima volta ed interessi quindi materiale intatto; i valori di resistenza residua sono quelli che agiscono lungo superfici ove si è già verificato uno scivolamento.

Tabella 9.

Tipo di prova	Resistenza di picco		Resistenza residua	
	$c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$ (gradi)	$c'_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'_r$ (gradi)
Taglio diretto	0.2	25°	0.021	15°
Comp. triassiale	0.5	22°		

Per quanto riguarda la resistenza delle Sabbie gialle del terrazzo marino gli Autori hanno supposto, in base a quanto realmente riscontrato in campagna, che esse siano

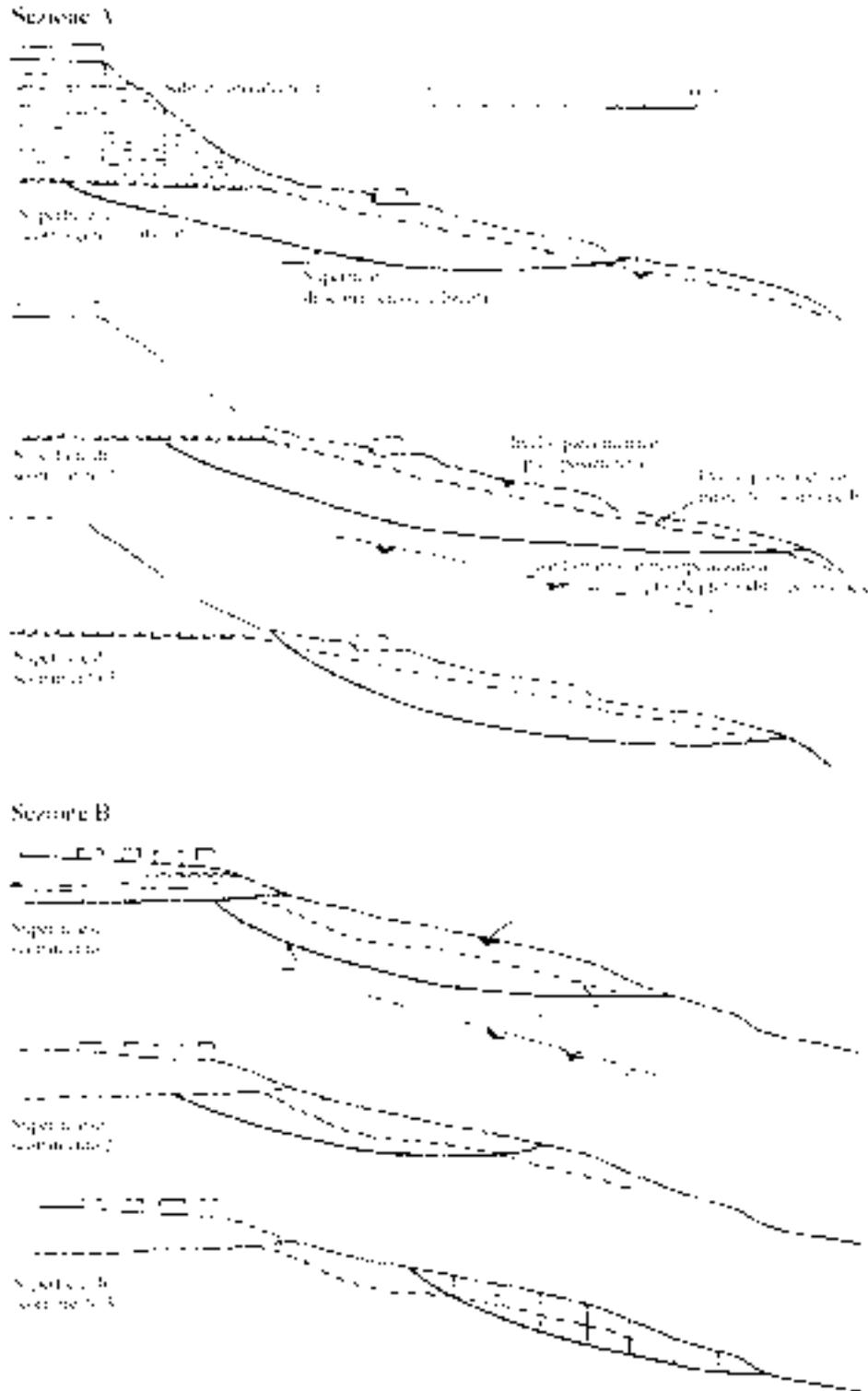


Figura 75. Alcune sezioni di analisi di stabilità (Da Guerricchio & Melidoro, 1979)

attraversate per tutto lo spessore da fessure ad andamento subverticale, per cui si è trascurata la loro resistenza, pur portandone in conto il peso.

I risultati ottenuti dall'elaborazione effettuata da Guerricchio & Melidoro sono sintetizzati nella tabella 10. Ad essi sono stati aggiunti i valori da me calcolati secondo il metodo del pendio infinito per il versante San Donato (fig. 58).

La scelta di portare un esempio che fosse indicativo di un metodo capace di “generalizzare” l’analisi di stabilità a tutta la collina è stata adottata per rendere più confrontabili i risultati di tali analisi con quelli ottenuti dalle simulazioni effettuate con FLAC.

Tabella 10. Risultati dell'analisi di stabilità. (Guerricchio & Melidoro, 1979; modificata).

Sez.	Posizione della falda	Valori del coefficiente di sicurezza FS					
		a		b		c	
	Parametri resistenza	Picco	Residuo	Picco	Residuo	Picco	Residuo
<b>A</b>	Superficie 1	1.98	1.08	2.12	1.17	2.75	1.59
	Superficie 2	1.54	0.78	2.02	1.04	2.52	1.39
	Superficie 3	1.56	0.72	1.79	0.88	2.39	1.46
<b>B</b>	Superficie 1	1.24	0.62	1.61	0.86	2.15	1.19
	Superficie 2	1.45	0.73	1.88	1.00	2.31	1.26
	Superficie 3	0.92	0.40	1.34	0.67	1.68	0.88
S. Donato		<1	<1	>1	<1	>1	<b>1.00</b>

Dalla tabella 10 si può osservare che con la resistenza di picco, i pendii sono di norma dotati di un congruo margine di sicurezza ( $FS > 1.2$ ); solo in un caso (sez. B; sup. 3; falda a p.c.) FS risulta minore dell'unità e solo assumendo la condizione assai gravosa di superficie piezometrica al piano campagna.

Si può ancora osservare che la posizione della superficie freatica gioca, come più volte sottolineato, un ruolo di notevole rilievo; passando infatti dall'ipotesi a all'ipotesi c i valori di FS aumentano del 50÷70% con valori intermedi per la più realistica ipotesi b.

Quando invece si passa a considerare la resistenza residua, come avviene per i modelli in FLAC, il quadro si modifica radicalmente; infatti con la superficie piezometrica nelle ipotesi a e b i pendii sono sempre instabili o al limite della stabilità e solo se si assume la condizione c, corrispondente ad una lunga stagione asciutta (terza ipotesi in FLAC), si verificano, nella maggior parte dei casi ma non in tutti, condizioni di stabilità.

La sensibile differenza che si ottiene tra i valori del fattore di sicurezza del settore di monte (sup. 1-2; sez. A e B) del versante e quelli relativi al settore di valle (sup. 3, sez. A e B) appare del tutto coerente con i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche effettuate con FLAC dalle quale risulta comunque evidente l'individuazione di due distinti processi di instabilità.

Il meccanismo di monte, più esteso e profondo, presenta in generale un maggior grado di stabilità rivelandosi di più difficile attivazione e subendo, in ogni caso, spostamenti minori e più lenti rispetto al movimento superficiale di valle. La presenza di filtrazione riduce in ogni caso significativamente la stabilità del versante in modo tanto più accentuato quanto più alto è il livello di falda.

Determinando quindi l'importanza del ruolo delle pressioni interstiziali e della sua distribuzione areale (livello piezometrico) come fattore destabilizzante e l'influenza che essa esercita sull'estensione e la localizzazione dei processi di frana.

Quanto esposto evidenzia l'importanza della distribuzione delle pressioni interstiziali oltretutto, come già noto, quale fattore destabilizzante ma anche come fattore ingerente sulla tipologia ed estensione dei movimenti di frana.

### 3.5 Il versante della Fontana Salsa (Pomarico)

Nel caso in esame è stato costituito un modello a partire dal profilo geologico A-B-C lungo il versante La Salsa (figg. 76, 31 e 38), interessato nel corso degli anni da alcune riattivazioni (prff. 2.4 e 4.4).

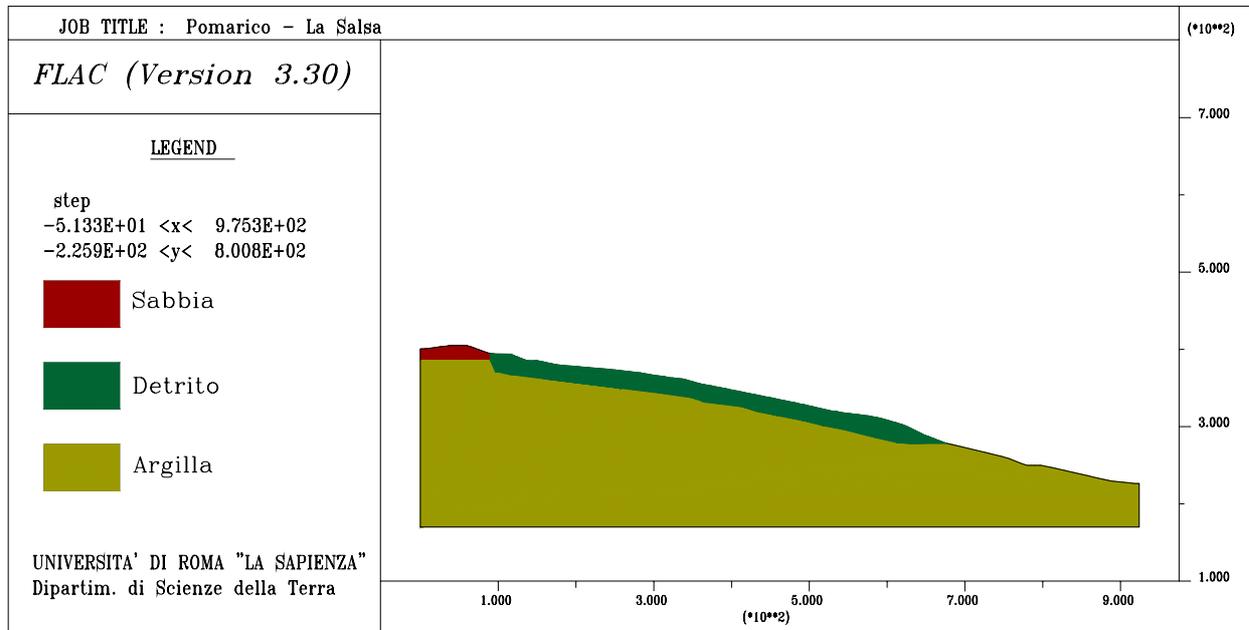


Figura 76. Modello schematico del profilo A-B-C (figg. 31 e 38), utilizzato nell'elaborazione con FLAC.

I fattori che hanno portato a scegliere la traccia del profilo sono così riassumibili: a) aree maggiormente colpite dalle riattivazioni della frana, in particolare dall'evento del 1977; b) disponibilità di dati geologici e di documentazione storico - scientifica.

Le aree maggiormente danneggiate in passato dalla riattivazione della frana sono state individuate attraverso l'interpretazione delle foto aeree e in base a dati dell'analisi storica.

Le informazioni geologiche sul settore interessato dalla frana sono state ottenute confrontando i risultati del rilevamento geologico e geomorfologico effettuato nell'area con le fonti bibliografiche (Lazzari, 1986; Lupo, 1994; Cherubini, Relazione Tecnica). In particolare sono stati presi in considerazione i dati relativi ai sondaggi S4, S9, S10, S19 (fig. 77; ubicazione in fig. 38).

In base a questi elementi è stato scelto un profilo parallelo alla direzione del movimento, partendo dal centro abitato, attraverso l'intero corpo di frana, in modo da comprendere i sondaggi sopra citati.

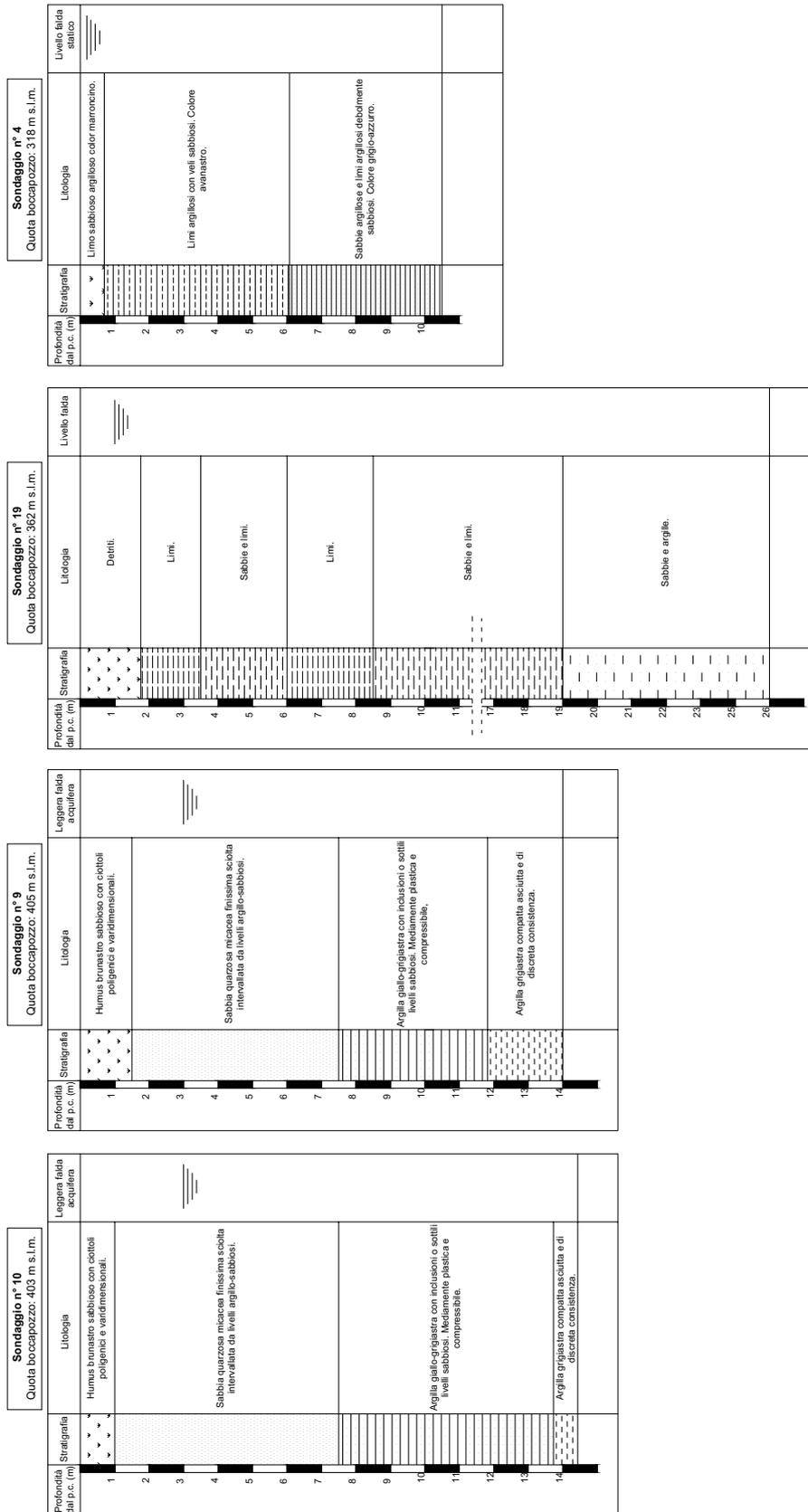


Figura 77. Sondaggi disponibili lungo il profilo utilizzato nel modello numerico (ubicazione in fig. 38).

La scelta delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali è dettata dalla considerazione delle numerose riattivazioni subite. È stata stimata, in base ad osservazioni dirette e dati bibliografici, una superficie di scorrimento a profondità di circa 18 m. Per simulare tali condizioni è stata impostata in FLAC una zona di spessore pari a 18 m in cui i valori delle proprietà geomeccaniche sono stati considerati in condizioni residue.

LITOTIPO ARGILLOSO. Le proprietà delle Argille sono state considerate omogenee nei modelli simulati con FLAC e sono:

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K_0$	$c$	$c_r$	$\phi$	$\phi_r$
$6.8 \times 10^8$	0.25	1	2	$2.9 \times 10^4$	0	$24^\circ$	$17^\circ$
	$D_{il}$	$\gamma_{dry}$	$\gamma_{sat}$	$n$	$K$		
	$15^\circ$	1500	2000	50	$10^{-15}$		

LITOTIPO SABBIOSO. È costituito prevalentemente da sabbia sciolta con intercalazioni di livelli di arenarie irregolarmente cementati (Sabbie di Monte Marano).

I parametri fisici e meccanici di questo litotipo sono stati attribuiti sulla base delle caratteristiche geolitologiche e geotecniche determinate da Cherubini & Walsh (1982). La percentuale granulometrica più rappresentativa è compresa tra 0.062 mm e 0.25 mm tra sabbia fine e sabbia grossa, mentre risulta trascurabile quella inferiore a 2  $\mu$  e quella maggiore di 0.25 mm è inferiore allo 0.8 %.

Dal punto di vista mineralogico la calcite, il quarzo, le miche e i plagioclasti risultano essere i minerali più rappresentati.

L'angolo di attrito di picco ricavato è compreso tra  $32^\circ - 37^\circ$ . Gli Autori considerano tale intervallo di valori come la somma di due componenti, la resistenza di attrito vero tra i granuli e il contributo legato al riordinamento tra i granuli stessi. I valori dell'angolo di attrito residuo sono inferiori di circa  $4^\circ - 5^\circ$  rispetto ai precedenti.

In base ai dati a disposizione si può affermare che il litotipo in esame mostra una discreta eterogeneità granulometrica e caratteristiche fisiche e meccaniche variabili. Il comportamento meccanico del litotipo sabbioso è stato considerato più simile a quello di materiali litoidi che a quello delle terre sciolte poiché si presenta da poco a ben cementato (Cherubini & Lupo, 1998).

I parametri attribuiti nella simulazione sono i seguenti:

<b>E<sub>0</sub></b> (Pa)	<b>v</b>	<b>α</b>	<b>K<sub>0</sub></b>	<b>c</b>	<b>c<sub>r</sub></b> (Pa)	<b>φ</b>	<b>φ<sub>r</sub></b>
4x10 <sup>10</sup>	0.3	1	-	10 <sup>2</sup>	0	32°	27°
		<b>dil</b>	<b>γ<sub>dry</sub></b>	<b>γ<sub>sat</sub></b>	<b>n</b>	<b>K</b>	
		0°	1600	1900	35	10 <sup>-7</sup>	

DETRITO SABBIOSO-ARGILLOSO. Per la simulazione con FLAC i parametri dei detriti di frana sono stati considerati simili a quelli delle Argille Grigio-Azzurre per le analogie riscontrate. Si è tenuto in considerazione, inoltre, lo stato di forte rimaneggiamento del terreno e la componente sabbiosa non trascurabile. Pertanto sono stati attribuiti i seguenti valori:

<b>E<sub>0</sub></b>	<b>v</b>	<b>α</b>	<b>K<sub>0</sub></b>	<b>c</b>	<b>c<sub>r</sub></b> (Pa)	<b>φ</b>	<b>φ<sub>r</sub></b>
1.86x10 <sup>8</sup>	0.2	1	-	2x10 <sup>3</sup>	0	25°	18°
		<b>dil</b>	<b>γ<sub>dry</sub></b>	<b>γ<sub>sat</sub></b>	<b>n</b>	<b>K</b>	
		0°	1500	2000	40	2.8x10 <sup>-12</sup>	

Le simulazioni, come nel caso di San Donato (Pisticci), sono state condotte sia in assenza di flusso sia in condizioni di flusso. Il passo della griglia è stato scelto di 6 m. Nel primo caso (analisi senza flusso), il modello relativo al profilo A-B-C (fig. 76) ha raggiunto una condizione di equilibrio iniziale confermato dall'andamento dell'*unbalanced force* (fig. 78).

Il modello nella condizione di equilibrio plastico in assenza di flusso non presenta delle zone plasticizzate, ciò conferma l'ipotesi secondo cui l'innesco del movimento è imputabile al decadimento delle resistenze al taglio con l'insorgere di pressioni di poro dovute alla presenza della falda nel terreno.

Le condizioni di filtrazione nel versante, lungo il profilo schematizzato in figura 76, sono state riprodotte definendo due modelli di flusso. È stata fissata la posizione della falda sul confine di monte a due quote differenti (-12m e -6m dal pc), facendo simulare al programma nel primo caso un flusso soltanto nella copertura detritica, mentre nel secondo caso (-6m dal pc), anche nelle sabbie sommitali.

Le altezze piezometriche sono state fissate in base ai dati bibliografici ed alle osservazioni dirette durante la campagna di monitoraggio delle sorgenti e dei pozzi presenti nell'abitato di Pomarico (prf. 2.4).

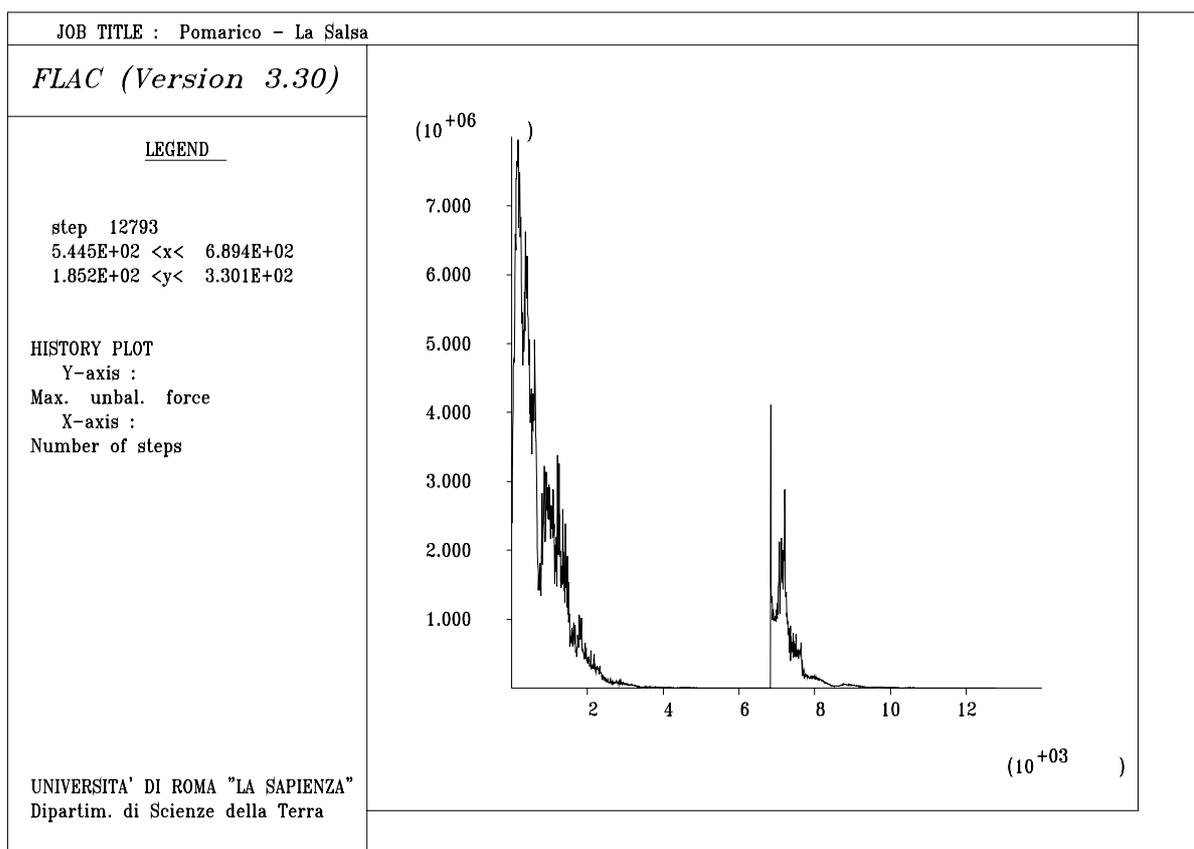


Figura 78. Modello in assenza di flusso: andamento dell'*unbalanced force*. Si nota il raggiungimento dell'equilibrio iniziale.

Come già evidenziato la circolazione dell'acqua all'interno della coltre detritica è risultata continua per tutto il periodo di osservazione; da qui la decisione di simulare due modelli con differenti quote piezometriche, una considerando la circolazione idrica solo all'interno delle coperture detritiche (fig. 79), l'altra con livello di falda all'interno delle sabbie (fig. 80), per modellare una situazione più gravosa per la stabilità del versante.

Come già descritto precedentemente a proposito della metodologia di analisi seguita, per ogni ipotesi di filtrazione nel sistema è stato dapprima raggiunto un equilibrio di solo flusso, verificato dall'andamento delle funzioni OUTFLOW e INFLOW durante i cicli di calcolo (figg. 81 e 82).

In entrambi i casi simulati le ipotesi di filtrazione non consentono al sistema di raggiungere l'equilibrio, come si può osservare dall'andamento dell'*unbalanced force* riportato in figura 83 per il caso con falda nei detriti, e in figura 84 relativo alla ipotesi con falda nelle sabbie, e dai diagrammi di plasticizzazione riportati rispettivamente nelle figure 85 e 86. In queste ultimi diagrammi si osserva come il versante abbia risposto in maniera differente alle due ipotesi di filtrazione.

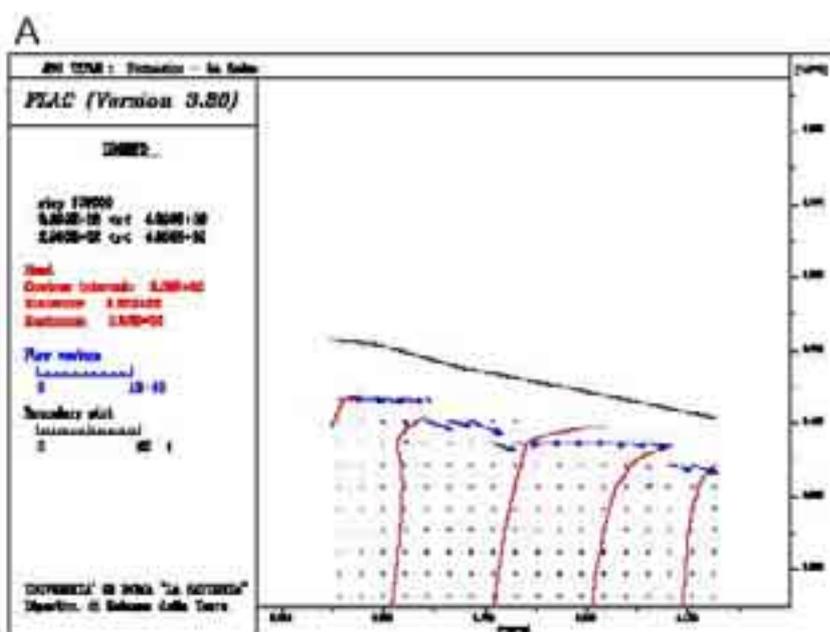
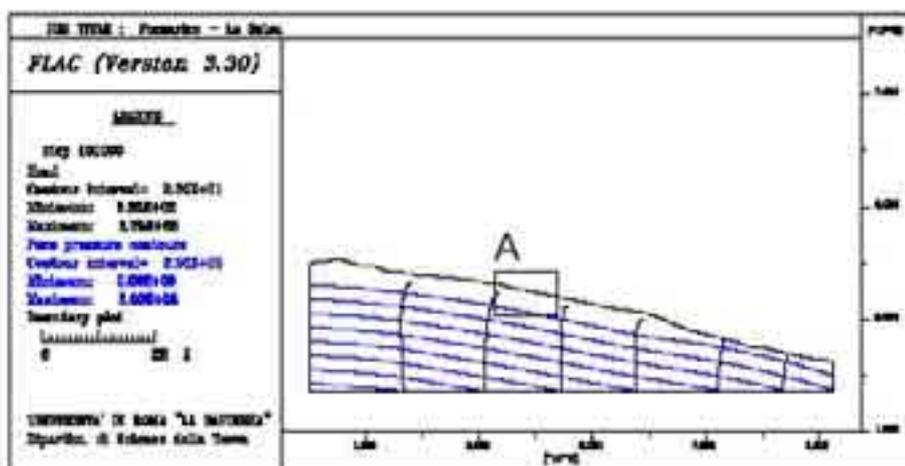


Figura 79. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi piezometrici.

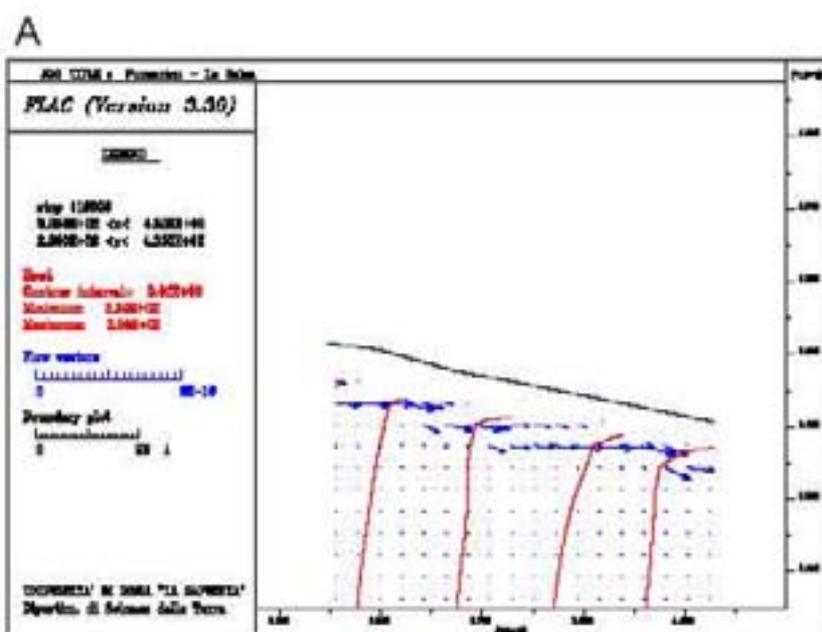
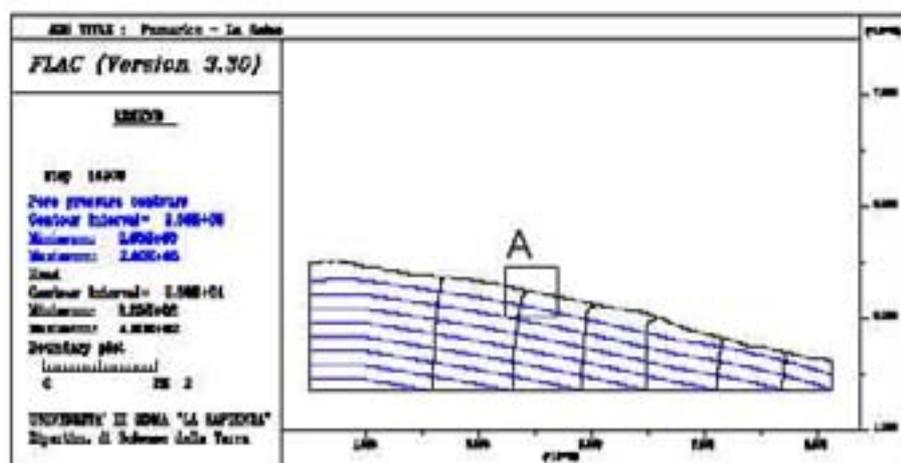


Figura 80. Modello con flusso nelle sabbie: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi piezometrici.

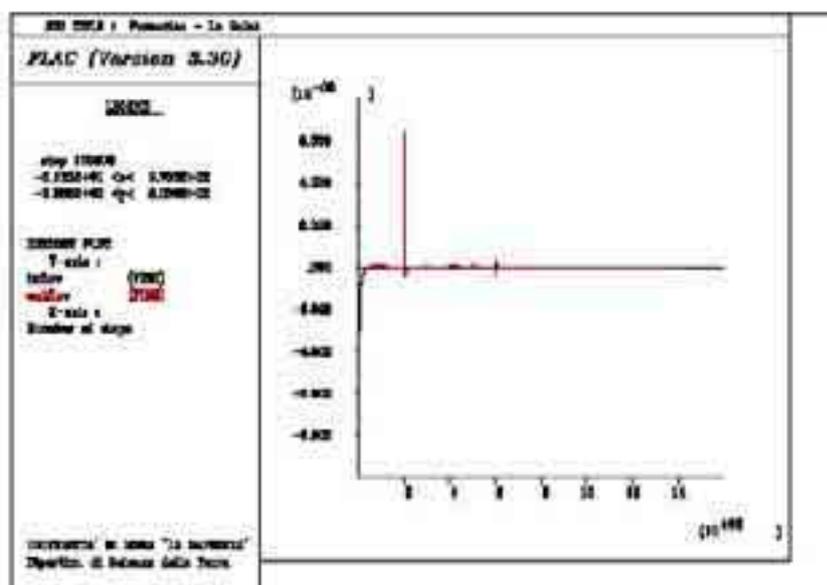


Figura 81. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento delle funzioni OUTFLOW ed INFLOW che dimostra il raggiungimento dell'equilibrio di flusso.

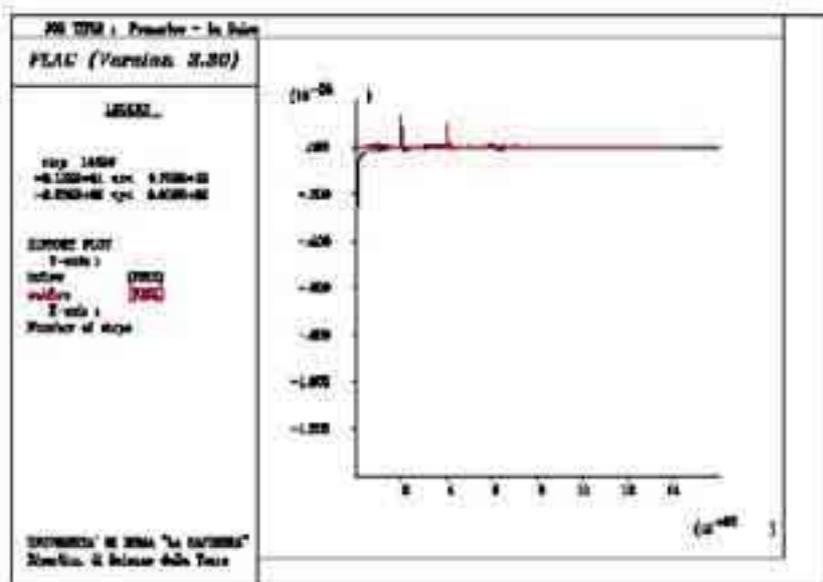


Figura 82. Modello con flusso nelle sabbie: andamento delle funzioni OUTFLOW ed INFLOW che dimostra il raggiungimento dell'equilibrio di flusso.

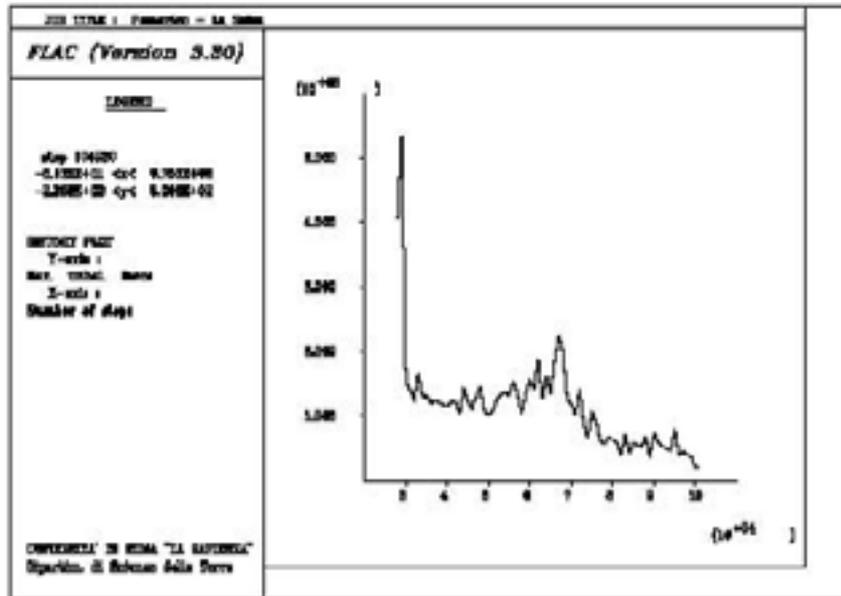


Figura 83. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento dell'unbalanced force che indica il non raggiunto equilibrio iniziale.

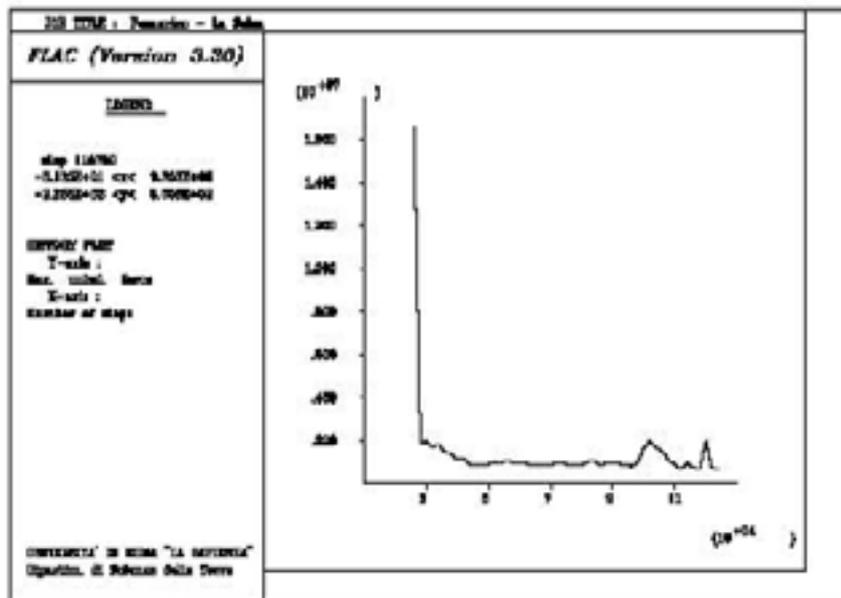


Figura 84. Modello con flusso nelle sabbie: andamento dell'unbalanced force che indica il non raggiunto equilibrio iniziale.

Nel primo caso (fig. 85), relativo alla falda nei detriti, si localizza a valle una zona plasticizzata che innesca un movimento al piede della frana, manifestandosi con un meccanismo di scorrimento con componenti prevalentemente traslative (fig. 87).

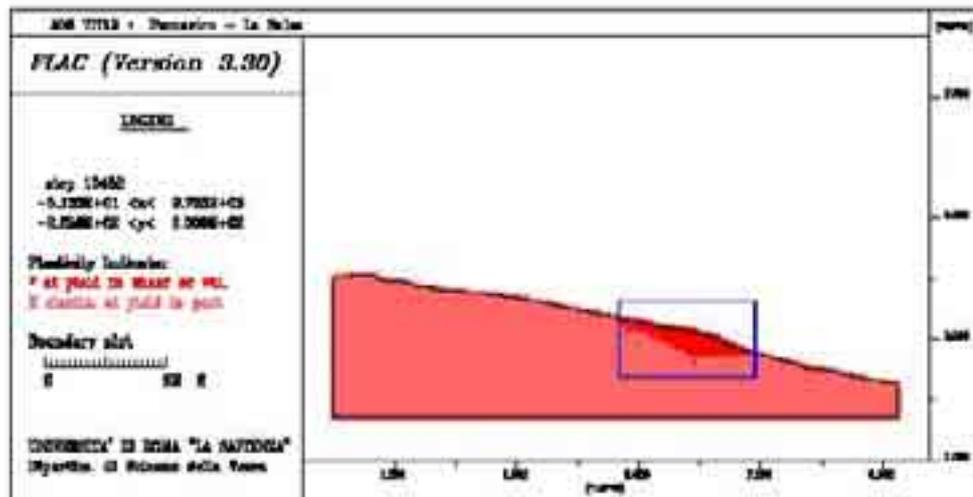


Figura 85. Modello con flusso nelle coperture detritiche: punti di plasticizzazione. (Il dettaglio del riquadro è in fig. 87).

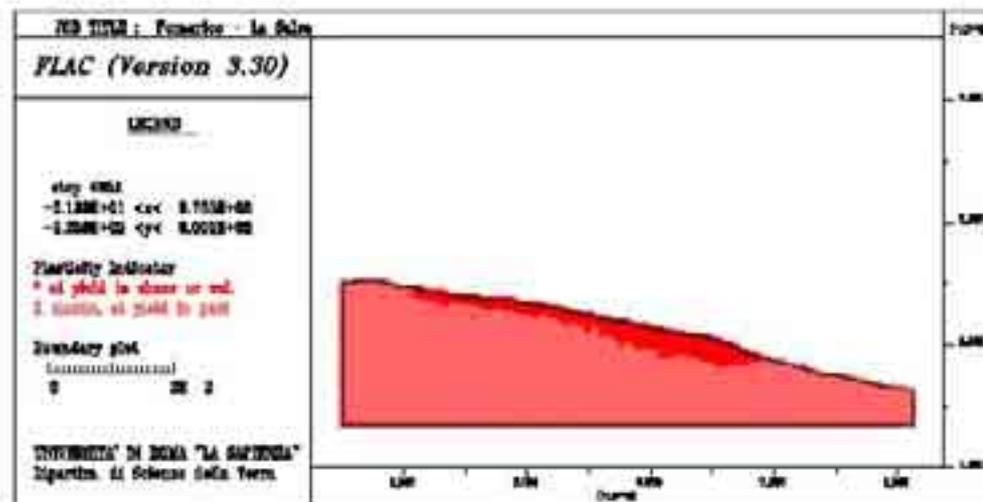


Figura 86. Modello con flusso nelle sabbie: punti di plasticizzazione.

La presenza della falda a quote maggiori (nelle sabbie sommitali, figg. 80, 86), aumenta l'ampiezza della zona plasticizzata che si espande dal piede all'interno del corpo di

frana quasi a lambire le sabbie. Tale meccanismo di scorrimento mostra, quindi, un carattere tipicamente retrogressivo.

I risultati ottenuti sono, seppur con i dovuti limiti della simulazione, confrontabili con i principali meccanismi di frana individuati nel versante della Salsa sulla base sia del rilevamento di campagna sia dell'interpretazione aereofotogeologica sia dei dati disponibili in letteratura (vedi paragrafo 2.4). La simulazione, infatti, appare coerente con l'esistenza di un meccanismo di scorrimento prevalentemente traslativo a carattere retrogressivo nella parte medio - bassa del pendio.

Le simulazioni in presenza di flusso, hanno consentito, inoltre, di osservare l'azione destabilizzante prodotta dalla filtrazione. In particolare, come nel caso di Pisticci, gli effetti peggiorativi (flusso nelle sabbie) interessano direttamente i fenomeni più superficiali nel settore di valle e solo indirettamente si spingono verso monte, condizionati dalla posizione ipotizzata della falda. Si deve ritenere, quindi, che siano proprio i movimenti franosi della parte bassa del versante la causa delle instabilità che hanno colpito la parte alta, immediatamente adiacente al limite dell'abitato.

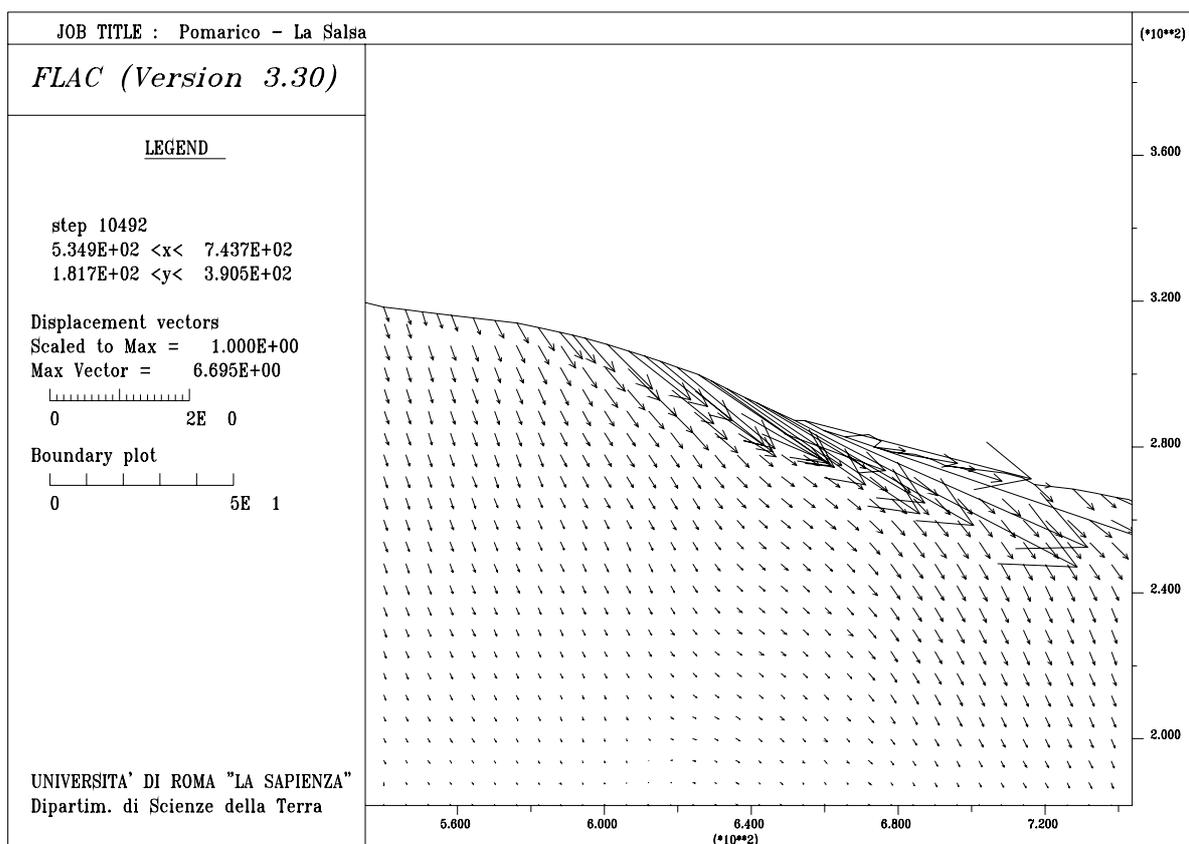


Figura 87. Vettori spostamento nella zona di valle nel caso di filtrazione nel detrito, particolare della figura 85.

### 3.6 Il versante NW di Montalbano Jonico

Il versante scelto è quello di NW (figg. 45 e 43), caratterizzato, a partire dagli anni cinquanta, da un elevato grado di franosità. La similitudine tra le tipologie e lo stato di attività delle frane che hanno colpito tale versante e quello SE della parte alta della collina permettono di estendere i risultati che seguono all'intero bordo dell'abitato.

Sulla base dei dati esposti nel paragrafo 2.5, la sezione che attraversa la frana Mo11 (fig. 45) è stata analizzata schematizzando l'assetto geologico in tre litotipi a giacitura suborizzontale: 1) litotipo argilloso a partire da circa 125 m s.l. fino a 270 m s.l.m.; 2) litotipo sabbioso (spessore 10 metri); litotipo sabbioso - conglomeratico (spessore 10 metri).

I parametri assegnati inizialmente ai terreni fanno riferimento a dati di bibliografia ed in particolare ai dati contenuti in Cherubini et al. (1984).

Litotipo argilloso

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K_0$	$c$	$\phi$	Dil	$\gamma_{sat}$
$2.4 \times 10^7$	0.25	1	2	$1.6 \times 10^3$	$24^\circ$	$15^\circ$	2000

Litotipo sabbioso

$E_0$	$\nu$	$\alpha$	$K$	$c$	$\phi$	Dil	$\gamma_{sat}$
$4 \times 10^{11}$	0.3	1	-	$10^2$	$34^\circ$	$0^\circ$	2100

Litotipo sabbioso - conglomeratico

$E_0$ (Pa)	$\nu$	$\alpha$	$K$	$c$	$\phi$	Dil	$\gamma_{sat}$
$4 \times 10^{11}$	0.3	1	-	$10^4$	$35^\circ$	$0^\circ$	2100

Il modello soggetto alla sola azione della gravità, ha mostrato immediatamente evidenti segni di instabilità. L'andamento dei vettori spostamento (fig. 88) evidenzia l'esistenza di due principali fenomenologie franose: una a modesta profondità che investe la parte alta del versante e l'altra più profonda che si spinge fino a circa 225 m di quota. Il movimento in entrambe i casi comincia nelle argille e si propaga ai sovrastanti termini sabbioso - conglomeratici. Tali meccanismi appaiono coerenti con le dinamiche descritte nel paragrafo 2.5 sulla base delle indagini di campagna, delle analisi delle foto aeree e dei dati storico - scientifici.

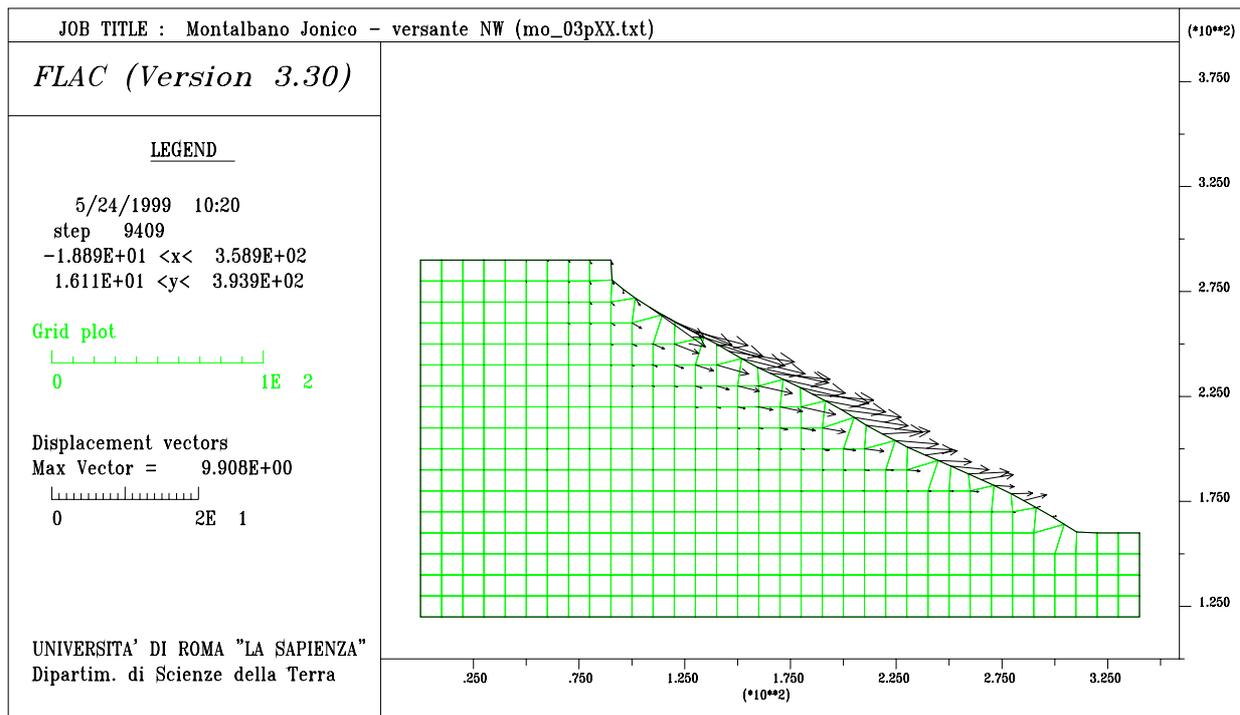


Figura 88. Andamento dei vettori spostamento.

Tuttavia il non raggiungimento delle condizioni di equilibrio iniziale ha creato dubbi sulla valutazione dei parametri dei materiali. È stato tentato quindi uno studio di tipo parametrico che consiste essenzialmente nel tentativo di aumentare i parametri di resistenza ed i moduli. Sono stati aumentati fino a due ordini di grandezza la coesione e i moduli, ma ciò non ha portato ancora al raggiungimento delle condizioni di equilibrio iniziale.

Nel caso di Montalbano Jonico, quindi, non è stato possibile indagare ulteriormente introducendo, come nei casi precedenti, elementi peggiorativi della stabilità del sistema quali il flusso sotterraneo.

I risultati ottenuti dimostrano certamente le precarie condizioni di stabilità dei bordi della collina testimoniata del resto dall'elevata frequenza dei fenomeni franosi. In ogni caso non essere riusciti a raffigurare le condizioni naturali di seppur precaria stabilità suggerisce la necessità di ulteriori indagini sulla caratterizzazione geomeccanica delle Argille Subappennine ed in particolar modo sugli effetti di alcuni elementi che potrebbero influenzare le proprietà di resistenza quali, per esempio, l'azione della capillarità nei terreni limoso - argillosi.

## Capitolo 4 - Modello idrologico-statistico

### 4.1 Primi risultati

Nella ricerca storica gli eventi di frana accaduti successivamente agli anni 50 sono risultati essere più numerosi e completi di informazioni quali: collocazione temporale e spaziale, descrizione dell'evento, informazioni topografiche e morfologiche, impatto socioeconomico, documentazione.

In queste elaborazioni, quindi, è stato trattato solo l'intervallo 1952-1987. Le informazioni sui fenomeni franosi individuati (vedi fig. 21) sono stati integrati e verificati sulla base di rilevamenti in sito e di analisi delle foto aeree (voli del 1954, 1972, 1977, 1987).

In figura 89 per il periodo 1952 - 1987 sono riportate le precipitazioni annuali, le precipitazioni cumulate nei 4 mesi piovosi ed il numero di eventi di frana esattamente datati censiti per ogni anno. Le informazioni così combinate indicano quanto segue: 1) a valori di precipitazione annuale  $> 900$  mm si associa un numero di eventi di frana  $> 5$ ; 2) a valori di precipitazione annua superiori/inferiori alla media annua non sempre corrisponde un incremento/decremento nel numero di eventi censiti, in altre parole non sembrerebbe esserci una relazione diretta ed immediata precipitazione annua - numero di eventi di frana. E' soprattutto nei periodi relativamente meno piovosi oppure negli anni immediatamente successivi a quelli a più abbondante precipitazione annua che tale relazione perde di significato, questo a palesare una influenza di più lunga durata del regime di precipitazione sull'accadimento dei movimenti franosi. Infatti, considerando per le precipitazioni anziché i valori annuali un valore medio ogni 5 anni (figura 90), si nota che i due quinquenni relativamente più piovosi (1957-1961; 1972-1976) sono accompagnati da un elevato numero di eventi, al contrario invece di quelli relativamente più secchi (decenni 1962 - 1971 e 1977 - 1986) ove il numero di eventi cala drasticamente. A questo si aggiunga che precipitazioni relativamente elevate nei mesi di novembre e dicembre di un dato anno solare concorrono a determinare l'accadimento di movimenti di versante nei mesi di gennaio - febbraio dell'anno successivo, andando così ad incidere sulla franosità dell'anno solare successivo. Questo risulta ancor più evidente analizzando per il periodo 1952 - 1987 la distribuzione mensile degli eventi di frana e quella delle precipitazioni massime mensili, ricavate come valore medio dei massimi (figura 91).E' chiaro uno sfalsamento tra massimo di

precipitazione mensile collocato in novembre e massimo di numero mensile di eventi di frana collocato invece in gennaio, come peraltro già segnalato per le sole riattivazioni (DEL PRETE et al., 1992a).

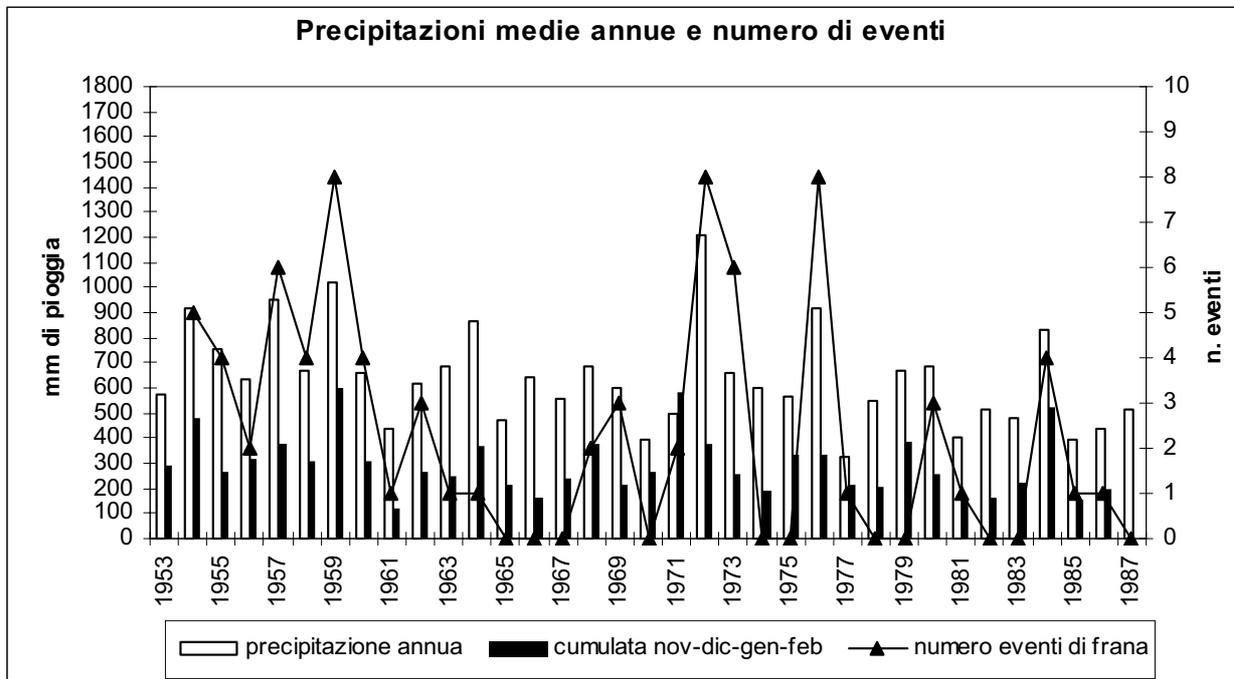


Figura 89. Confronto tra le precipitazioni annuali, le precipitazioni cumulate nei 4 mesi piovosi ed il numero di eventi di frana censiti per ogni anno (periodo 1952 - 1987).

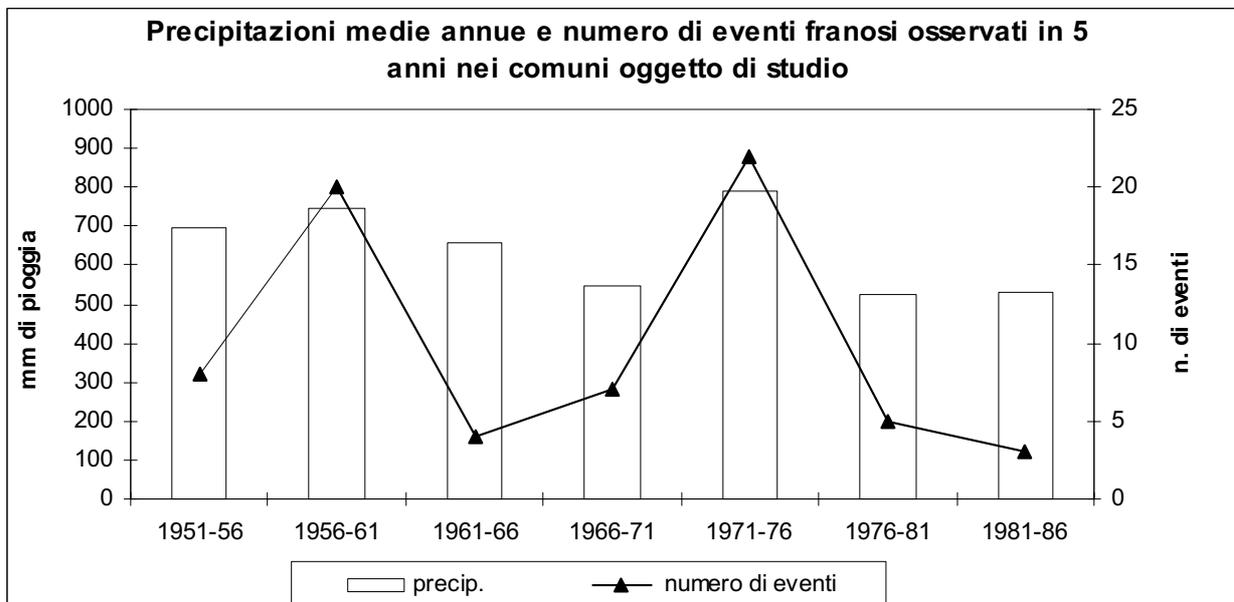


Figura 90. Confronto tra le precipitazioni quinquennali ed il numero di eventi di frana censiti in 5 anni (periodo 1952 - 1987).

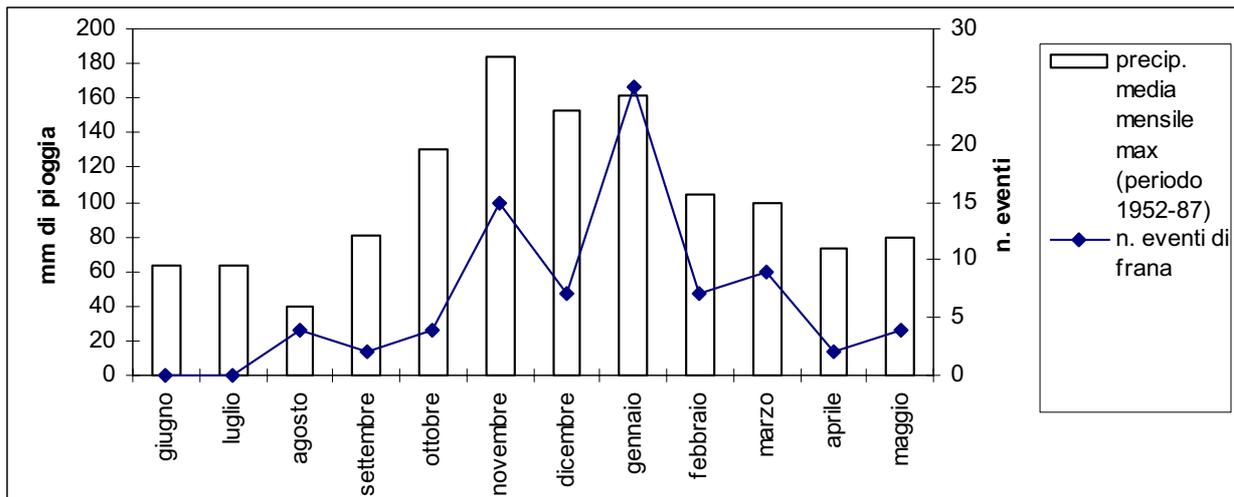


Figura 91. Confronto tra la distribuzione mensile degli eventi di frana e quella delle precipitazioni massime mensili, ricavate come valore medio dei massimi (periodo 1952 - 1987).

In figura 92 a-g è riportata una visione analitica di quanto accaduto negli inverni 1954 - 55, 1957 - 58, 1959 - 1960, 1971 -72, 1972 - 73, 1976 -77, 1984 - 85, durante i quali nell'area si sono notoriamente prodotti effetti alluvionali e si sono verificati circa il 70% del totale degli eventi di frana censiti in tutto il periodo. Si constata che per tutti i 7 periodi esaminati la curva che rappresenta la precipitazione cumulata (calcolata a partire dal 1/06 per convenienza di rappresentazione) si trova totalmente o parzialmente al di sopra della curva che rappresenta la precipitazione cumulata mediata nell'intervallo 1952 - 1987. Considerando il periodo giugno - maggio, il primo mese in cui sono stati registrati eventi di frana è caratterizzato da una precipitazione cumulata sia mensile sia cumulata dal mese di giugno notevolmente al di sopra dei corrispondenti valori medi, anche per gli eventi di frana accaduti nei mesi estivi. A partire da questo primo mese, generalmente ricadente tra ottobre e gennaio, si continuano a registrare eventi di frana nei mesi successivi anche se la precipitazione cumulata mensile del mese in cui l'evento si è verificato poco o nulla si discosta dai valori medi, con un numero maggiore di eventi qualora i mesi successivi continuino ad essere caratterizzati da precipitazioni mensili anch'esse al di sopra dei valori medi. Va sottolineato che nei periodi immediatamente successivi ai sette eventi considerati alluvionali si è registrata una diffusa franosità in tutta l'area, tutto ciò di nuovo a rappresentare le conseguenze a lungo termine di un evento piovoso sulla stabilità dei versanti dell'area bradanica.

Da quanto esposto, che vuole essere solo un esempio di quanto deducibile da numerosi altri simili diagrammi riferiti ad altri intervalli di tempo, ne consegue che nello studio del ruolo delle precipitazioni nei movimenti di massa avvenuti in Fossa Bradanica

bisogna tenere conto sia di precipitazioni immediatamente precedenti ai fenomeni sia di quantitativi di pioggia cumulati su lunghi periodi, fino a 180 giorni prima dell'evento. Si è ritenuto pertanto, che la variabile idrologica maggiormente rappresentativa per l'area in esame delle relazioni precipitazioni-frane possa trovarsi sino ai 180 giorni che precedono l'evento. Tale affermazione trova conferma nei modelli completi di versante che sono stati delineati nei capitoli 2 e 3 ed in particolar modo nelle informazioni che riguardano le modalità di infiltrazione e circolazione sotterranea delle acque di origine meteorica.

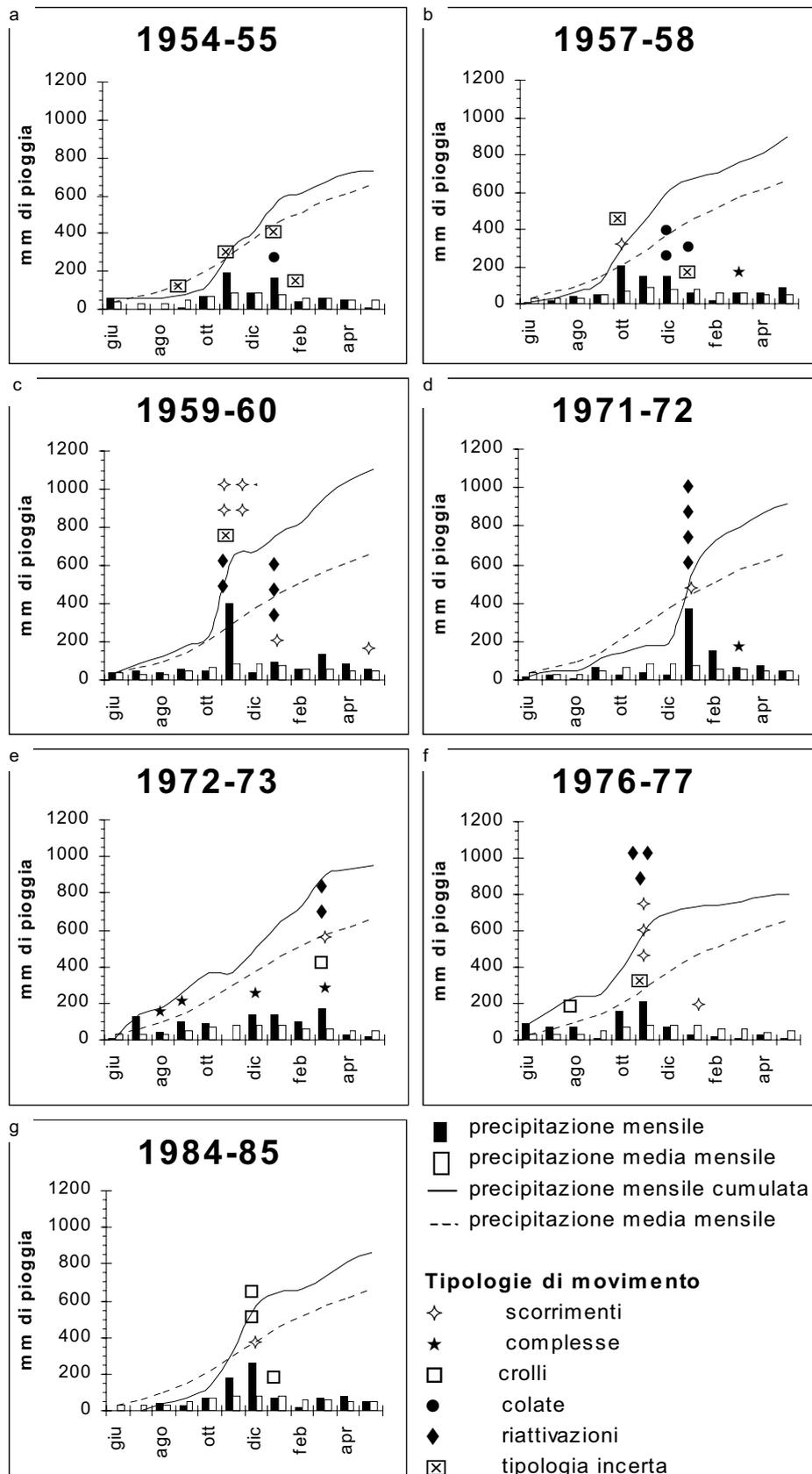


Figura 92. Eventi alluvionali e frane nel periodo 1952-1987.

## 4.2 Il modello probabilistico

A questo punto della Tesi ritengo opportuno richiamare alcuni concetti esposti nel capitolo introduttivo sul tipo di elaborazione idrologico - statistica che è stata intrapresa in questo studio.

Il modello adottato è del tipo "soglia " con importanti modifiche da me introdotte che saranno esposte nel paragrafo 4.5. Tale modello richiede la definizione della  $Y(t)$  (Eq. 4), funzione della serie temporale di intensità di precipitazione  $X(t)$ ; la scelta di un modello probabilistico per la stima della distribuzione di probabilità di tale funzione e la determinazione della migliore "soglia" di innesco dei fenomeni franosi.

Per quanto riguarda la scelta della variabile idrologica  $Y(t)$  in grado di giustificare l'innesco dei movimenti di versante, le informazioni sin qui ottenute indicano chiaramente che essa va ricercata nella pioggia giornaliera cumulata, fino anche a 180 giorni prima dell'evento franoso.

Il modello probabilistico adottato è la distribuzione GEV (*Generalized Extreme Value*) introdotta da Jenkinson (1955) ed ampiamente utilizzata nello studio degli eventi estremi, come ad esempio nel *Flood Studies Report* della Gran Bretagna (NERC, 1975), per la valutazione delle portate di piena.

La scelta di tale modello è legata sostanzialmente alla sua flessibilità ed alla capacità di giustificare l'andamento di alcune statistiche campionarie come il coefficiente di asimmetria. Va sottolineato che attualmente si stanno mettendo a punto altri modelli con una base teorica più aderente al fenomeno fisico che si deve interpretare, le cui prestazioni andranno confrontate con quelle del modello GEV. Tuttavia dal punto di vista metodologico il ricorso ad un modello o ad un altro non introduce sostanziali variazioni, mentre per quanto riguarda la valutazione dei periodi di ritorno le incertezze connesse con la scelta del modello si fanno risentire soprattutto per i valori più elevati, superiori cioè a 50/100 anni (Arnell & Gabriele, 1988).

Ritornando alla funzione GEV, la sua funzione di probabilità cumulata (FPC) è:

$$\text{Eq. 17} \quad F_{X(x)} = \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k(x-u)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\}; k \neq 0, \quad \alpha > 0$$

dove  $u$  e  $\alpha$  sono rispettivamente il parametro di locazione e di scala mentre  $k$ , parametro di forma, determina il tipo di distribuzione. Nel caso di  $k=0$  essa coincide con la più nota distribuzione di Gumbel.

Per quanto riguarda la stima dei parametri, Hosking et al. (1984) suggeriscono di utilizzare il metodo dei momenti pesati in probabilità PWM (*Probability Weighted Moments*) introdotto da Greenwood et al. (1979) e dati dall'equazione:

$$\text{Eq. 18} \quad \beta_r = (r + 1)^{-1} \left\{ u + \frac{\alpha [1 - (r + 1)^{-k} \Gamma(1 + k)]}{k} \right\}$$

dove  $\beta_r$  è il momento di ordine  $r$  e  $\Gamma(\cdot)$  rappresenta la funzione gamma.

Dalla combinazione dei tre momenti  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  si ottiene:

$$\text{Eq. 19} \quad \beta_0 = u + \frac{\alpha \{1 - \Gamma(1 + k)\}}{k}$$

$$\text{Eq. 20} \quad 2\beta_1 - \beta_0 = \frac{\alpha \Gamma(1 + k)(1 - 2^{-k})}{k}$$

$$\text{Eq. 21} \quad \frac{3\beta_2 - \beta_0}{2\beta_1 - \beta_0} = \frac{1 - 3^{-k}}{1 - 2^{-k}}$$

Gli stimatori PWM  $\hat{u}, \hat{\alpha}$ , e  $\hat{k}$  sono la soluzione del sistema sopra riportato quando ai  $\beta_r$  si sostituiscono i loro stimatori  $b_r$ .

Wallis et al. (1984) suggeriscono per l'equazione 22, di non immediata soluzione, una espressione semplificata:

$$\text{Eq. 22} \quad k = 7.8589c + 2.9554c^2$$

con

$$\text{Eq. 23} \quad c = \frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3}$$

La stima di  $\beta_r$  può essere effettuata, una volta ordinati i massimi ( $X_j$ ) in senso crescente, utilizzando la statistica:

Eq. 24

$$b_r = n^{-1} \sum_{j=1}^n \left[ \frac{(j-0.35)}{n} \right]^r X_j$$

che è uno stimatore di  $\beta_r$  introdotto da Hosking et al. (1985). Nella Eq. 25  $n$  è la dimensione campionaria.

### 4.3 Applicazione del modello probabilistico alle "aree campione"

A partire dalle osservazioni pluviometriche giornaliere delle stazioni di Montalbano J., Pisticci e Pomarico sono state calcolate le variabili  $PC_n$ , piogge cumulate per  $n$  pari a 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni consecutivi. I dati relativi alle variabili statistiche  $PC_n$  sono stati calcolati secondo la seguente relazione:

$$\text{Eq. 25} \quad PC_{n,j} = \sum_{i=j-n+1}^j P_i \quad \text{con } n = 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180;$$

dove:

$j$  = numero progressivo dei  $Z$  giorni che compongono il periodo di rilevazione, può essere pari a 1, 2, 3, ..... $Z$ ;

$P_i$  = altezza di precipitazione verificatasi l' $i$ esimo giorno del periodo di osservazione.

Dalle serie dei dati così generate sono stati estratti, anno per anno, i valori massimi di ciascuna delle  $PC_n$ . A partire da essi sono stati determinati i parametri della funzione GEV applicando il metodo PWM (Probability Weighted Moments). I valori assunti dai parametri di posizione ( $u$ ), di scala ( $\alpha$ ) e di forma ( $k$ ) sono riportati, per ciascuna variabile idrologica, in tabella 11.

Il confronto grafico tra la funzione di probabilità individuata e le frequenze dei valori misurati, ha permesso di valutare l'attendibilità della metodologia applicata (figg. 93, 94 e 95).

Il confronto non appare soddisfacente solo per valori di frequenza e probabilità cumulate (tempo di ritorno) maggiori di 20 anni. Questa circostanza è dovuta all'incapacità di tale funzione di distribuzione di soddisfare la *condizione di separazione* (Polemio, 1993). La condizione si manifesta mediante il rilevamento di pochi valori, tanto significativamente più grandi degli altri e quindi tanto eccezionali da sembrare statisticamente separati dai restanti (a meno dei possibili errori dipendenti dalle misure e/o dalla loro digitalizzazione). Tali valori sono noti come *outliers*. In questi casi l'uso della GEV, rispetto a funzioni sensibili alla condizione di separazione, induce generalmente alla sotto stima dell'entità della cumulata per un assegnato tempo di ritorno, viceversa, assegnato un valore di cumulata, il tempo di ritorno è sovrastimato.

Tabella 11. Valori dei parametri della GEV per ciascuna variabile idrologica considerata.

<b>Montalbano Jonico</b>									
<b>Piogge cumulate (giorni)</b>									
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>180</b>
<b>k</b>	-0.112	-0.037	-0.102	-0.066	-0.108	-0.025	-0.040	-0.069	-0.015
<b><math>\alpha</math></b>	34.2	48.4	49.6	60.1	67.5	94.7	114.1	123.4	143.1
<b>u</b>	74.7	98.7	114.3	147.3	173.3	256.5	321.0	371.1	462.8

<b>Pisticci</b>									
<b>Piogge cumulate (giorni)</b>									
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>180</b>
<b>k</b>	-0.181	-0.203	-0.224	-0.203	-0.179	-0.122	-0.066	-0.061	-0.055
<b><math>\alpha</math></b>	28.8	37.1	40.8	49.3	59.5	86.2	105.3	114.6	128.8
<b>u</b>	66.9	82.0	97.7	130.4	157.9	227.5	289.7	335.1	420.1

<b>Pomarico</b>									
<b>Piogge cumulate (giorni)</b>									
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>180</b>
<b>k</b>	-0.248	-0.249	-0.185	-0.176	-0.159	-0.095	-0.036	-0.052	-0.018
<b><math>\alpha</math></b>	24.3	34.2	41.4	48.7	61.3	86.0	111.6	123.8	144.6
<b>u</b>	60.4	76.4	96.3	124.3	148.9	220.8	279.3	329.6	415.7

In genere le funzioni in grado di soddisfare la condizione di separazione sono a quattro parametri, ma la stima di essi, basata su una singola serie di dati, induce una grande incertezza (Rossi et al., 1984; Arnell & Gabriele, 1988; Polemio & Dragone, 1992). Per tale ragione, nei casi in esame si è ripiegato su modelli che utilizzino meno parametri, in un certo senso più rigidi, quali i modelli GEV.

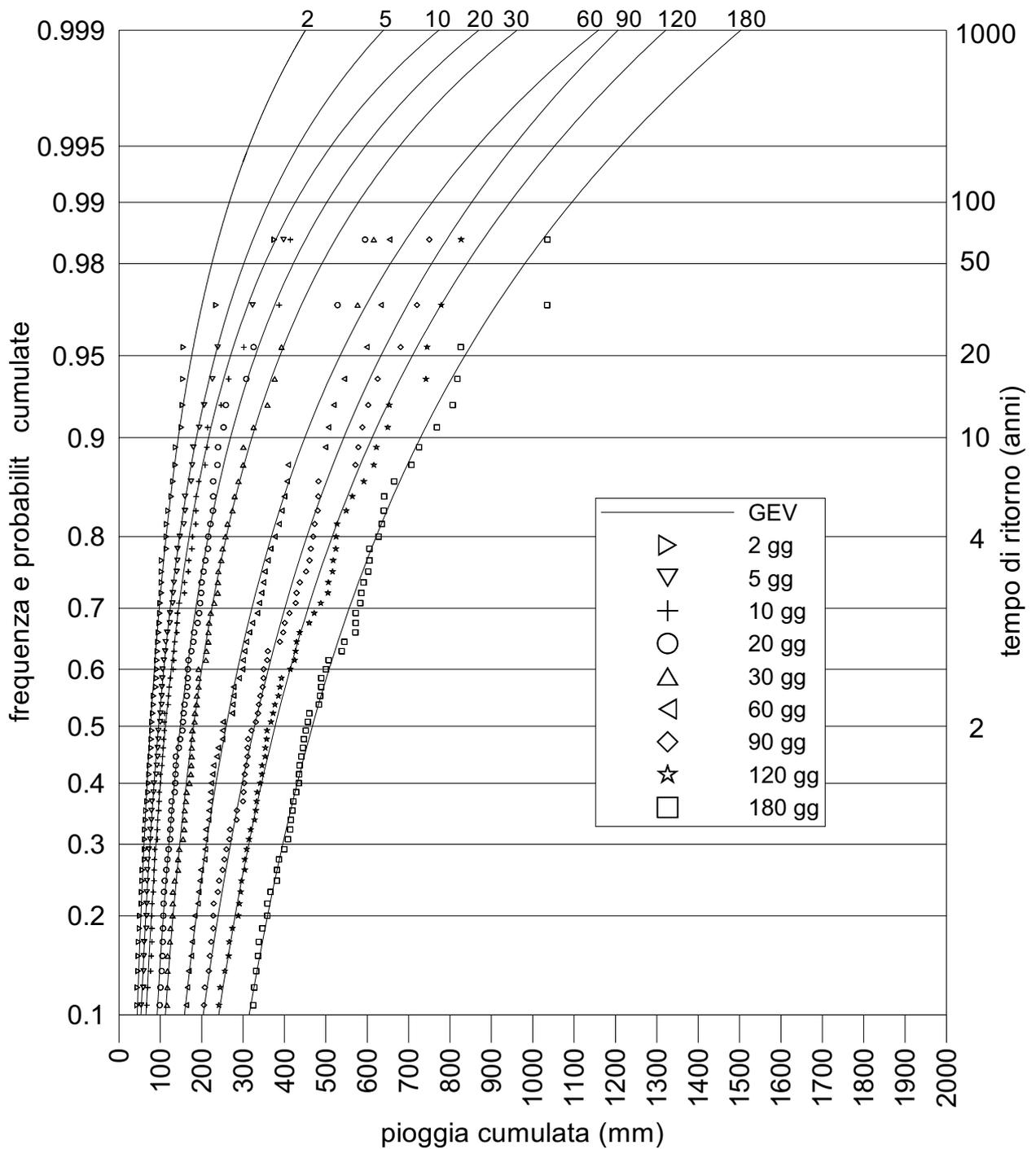


Figura 93. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Pisticci.

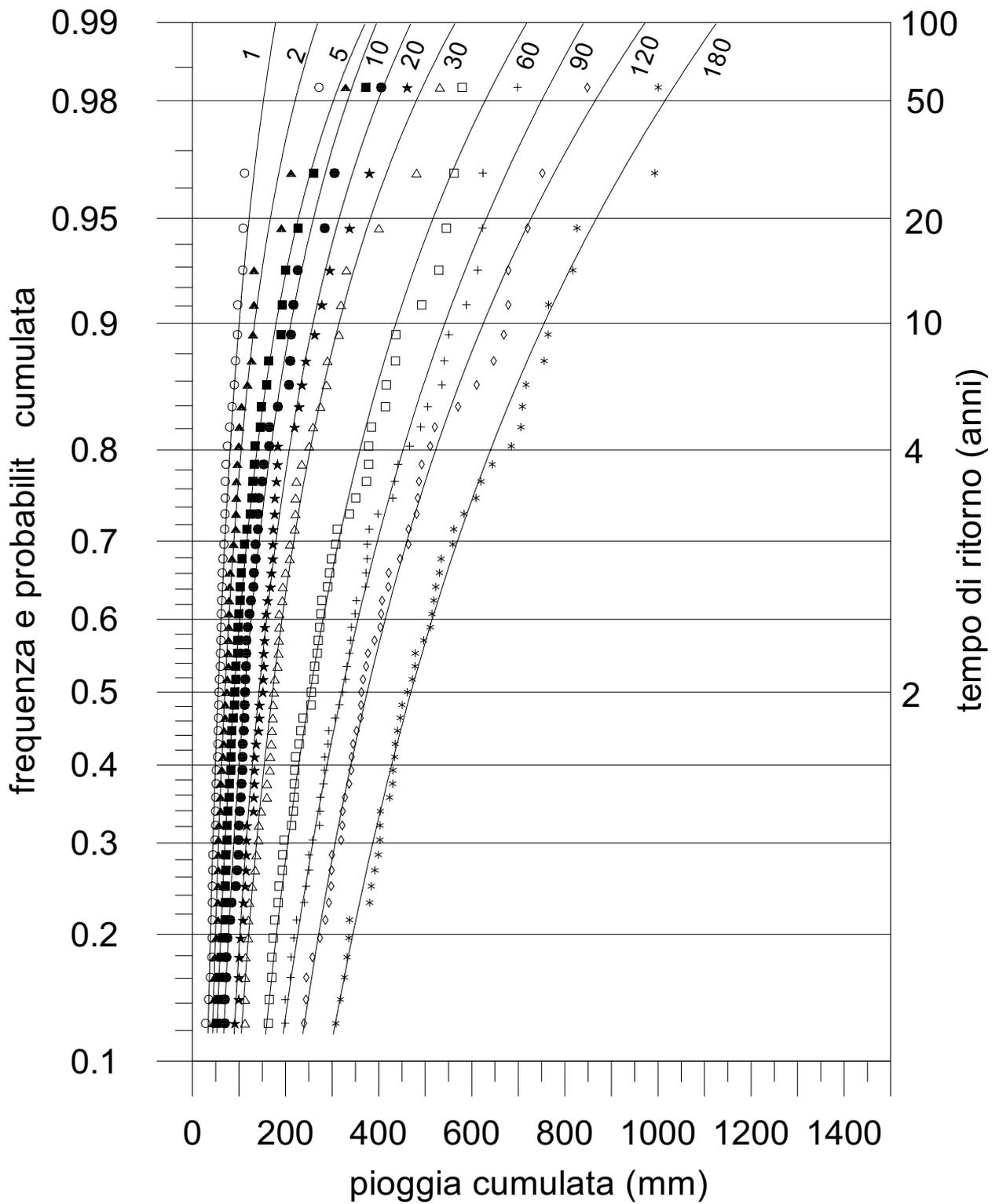


Figura 94. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Pomarico.

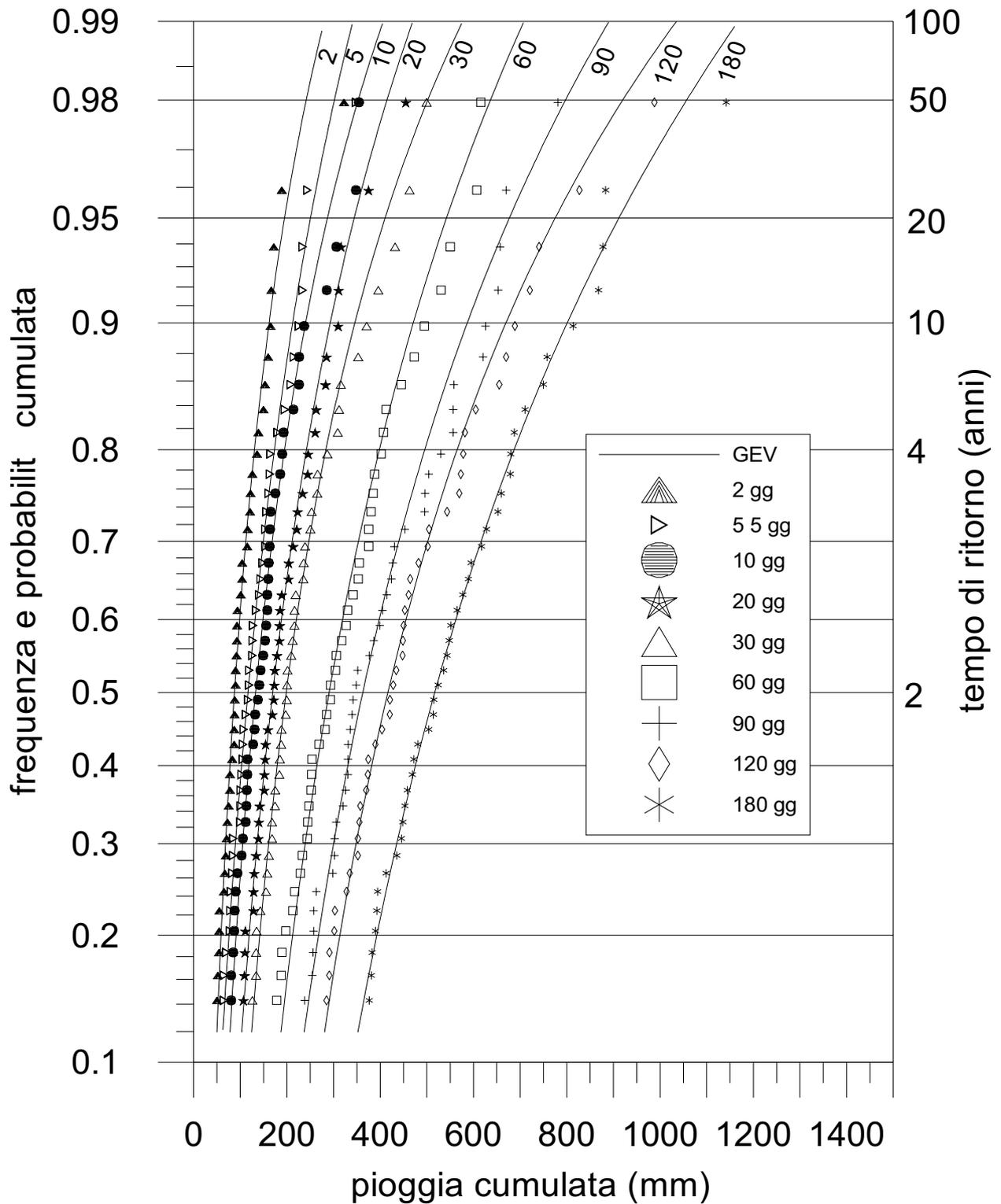


Figura 95. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Montalbano J..

## 4.4 Corrispondenza frane-precipitazioni

### 4.4.1 Pisticci

Nei casi di Pisticci e Pomarico, dato l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dei versanti, si è tentato di individuare, come si vedrà in questo paragrafo e nel successivo, gli eventi di pioggia che pur essendo localizzati in periodi anche di diversi giorni a ritroso rispetto alle date di attivazione di frana, possano aver influenzato la stabilità dei pendii.

Le frane di Pisticci di cui sono esattamente note la data di accadimento, la localizzazione, la tipologia e le dimensioni sono solo 10 di tutti gli eventi di cui si ha notizia storica (fig. 26).

In tabella 12 sono riportate le principali caratteristiche delle frane utilizzate nella modellazione. Il contenuto della tabella necessita alcune precisazioni: gli eventi da Pi01 a Pi03 che hanno colpito il Rione Croci, si riferiscono ai *fenomeni premonitori* dello scivolamento rotazionale del 1976 (Pi10); in questo caso le caratteristiche elencate in tabella si riferiscono all'ultimo fenomeno parossistico. Negli altri casi, i campi relativi alla superficie sommitale dislocata e all'arretramento max del bordo, si riferiscono agli effetti di riattivazioni di frana avvenute in aree (San Donato, versante antistante a Via Paisiello e Rione Dirupo) in cui sono presenti fenomeni franosi estremamente complessi la cui dinamica è stata illustrata nei capitoli precedenti; gli altri campi della tabella fanno riferimento, quindi, alle intere zone franose individuate.

Allo scopo di individuare il carattere di eccezionalità delle piogge antecedenti ai movimenti franosi considerati, sono stati realizzati, sulla base della figura 93, i diagrammi delle figure 96 e 97. Le linee in nero, ricavate dalla figura 93, indicano il periodo di ritorno della variabile idrologica i cui valori (pioggia cumulata in  $n$  giorni) sono riportati rispettivamente sull'asse delle ordinate e delle ascisse. Ad esempio, se consideriamo la cumulata a 180 giorni ( $x=180$ ), un tempo di ritorno di 2 anni (intersezione della linea  $x=180$  con la curva  $T=2$  anni) corrisponde ad un quantitativo di pioggia cumulata di 468 mm (ordinata del punto di intersezione); allo stesso modo un tempo di ritorno di 4 anni della cumulata a 180 giorni è relativo ad una pioggia di 621 mm e così di seguito. Si può anche ragionare a partire dalle quantità di precipitazione: ad un valore di 200 mm, per esempio, corrisponde un periodo di ritorno di 20 anni se cumulato in 2 giorni, di 10 anni se cumulato in 7 giorni, di 4 anni se cumulato in 15

giorni e così via. In altre parole, tali grafici rappresentano un abaco sul quale plottare le piogge cumulate antecedenti ai fenomeni franosi studiati, per verificarne i tempi di ritorno.

Tabella 12. Principali caratteristiche delle frane utilizzate nella modellazione (ubicazione in fig. 26).

Id	Pi01	Pi02	Pi03	Pi04	Pi05	Pi06	Pi07	Pi08	Pi09	Pi10
<b>Data</b>	24/11/59	17/01/61	19/10/63	12/03/69	15/03/72	21/08/72	05/09/72	02/01/73	30/03/73	21/11/76
<b>Località colpita</b>	Rione Croci	Rione Croci	Rione Croci	Via Paisiello	San Donato	San Donato	San Donato	San Donato	Rione Dirupo	Rione Croci
<b>Tipo di movimento</b>	Scorrimento roto-traslazionale	Scorrimento roto-traslazionale	Scorrimento roto-traslazionale	Scorrimento rotazionale	Scorrimento roto-traslazionale	Scorrimento roto-traslazionale				
	Colata	Colata	Colata	Scorrimento traslazionale		Colata				
				Colata	Colata	Colata	Colata	Colata		
<b>Litologia</b>	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali	Depositi sommitali
	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille	Argille
				Detrito di frana						
<b>Larghezza sup. di rottura (m)</b>	340	340	340	330	210	210	210	210	220	340
<b>Profondità sup. di rottura (m)</b>	30-40	30-40	30-40	25-30	25-30	25-30	25-30	25-30	-	30-40
<b>Superficie in frana (mq)</b>	64000	64000	64000	100000	120000	120000	120000	120000	48000	64000
<b>Superficie sommitale dislocata (mq)</b>	8000	8000	8000	150-250	1500	1500	1500	1500	-	8000
<b>Arretramento max bordo terrazzo (m)</b>	40	40	40	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	-	40
<b>FONTE</b>	Guerr. AVI	Guerr. AVI	Guerr.	AVI	AVI	AVI	AVI	Guerr.	AVI	Guerr. AVI
<b>Note</b>	Apertura fessura Rione Croci	Ripresa Frana Croci	Ripresa Frana Croci	Frana Riattivazione	Ripresa Frana Dirupo	Frana				

Le piogge associate ai fenomeni franosi dei Rioni Croci e Dirupo (fig. 96) sono state separate da quelle di Via Paisiello e San Donato (fig. 97) in virtù delle differenze di tipologia (tipo di movimento, materiale coinvolto) acclerate (prf. 2.3) per le diverse aree franose. Le piogge associate a ciascun fenomeno di frana sono state calcolate a partire dal giorno dell'evento (giorno 0) e cumulate a ritroso fino a 180 giorni prima.

In base a quanto detto, è possibile calcolare il tempo di ritorno per qualsiasi valore assunto dalla variabile idrologica nei giorni antecedenti alle frane attraverso i diagrammi delle figure 96 e 97.

Le osservazioni che seguono dall'analisi di dette figure sono riassunte in tabella 13. In essa sono riportati il numero di giorni (D in colonna IV) calcolati a partire dal giorno di

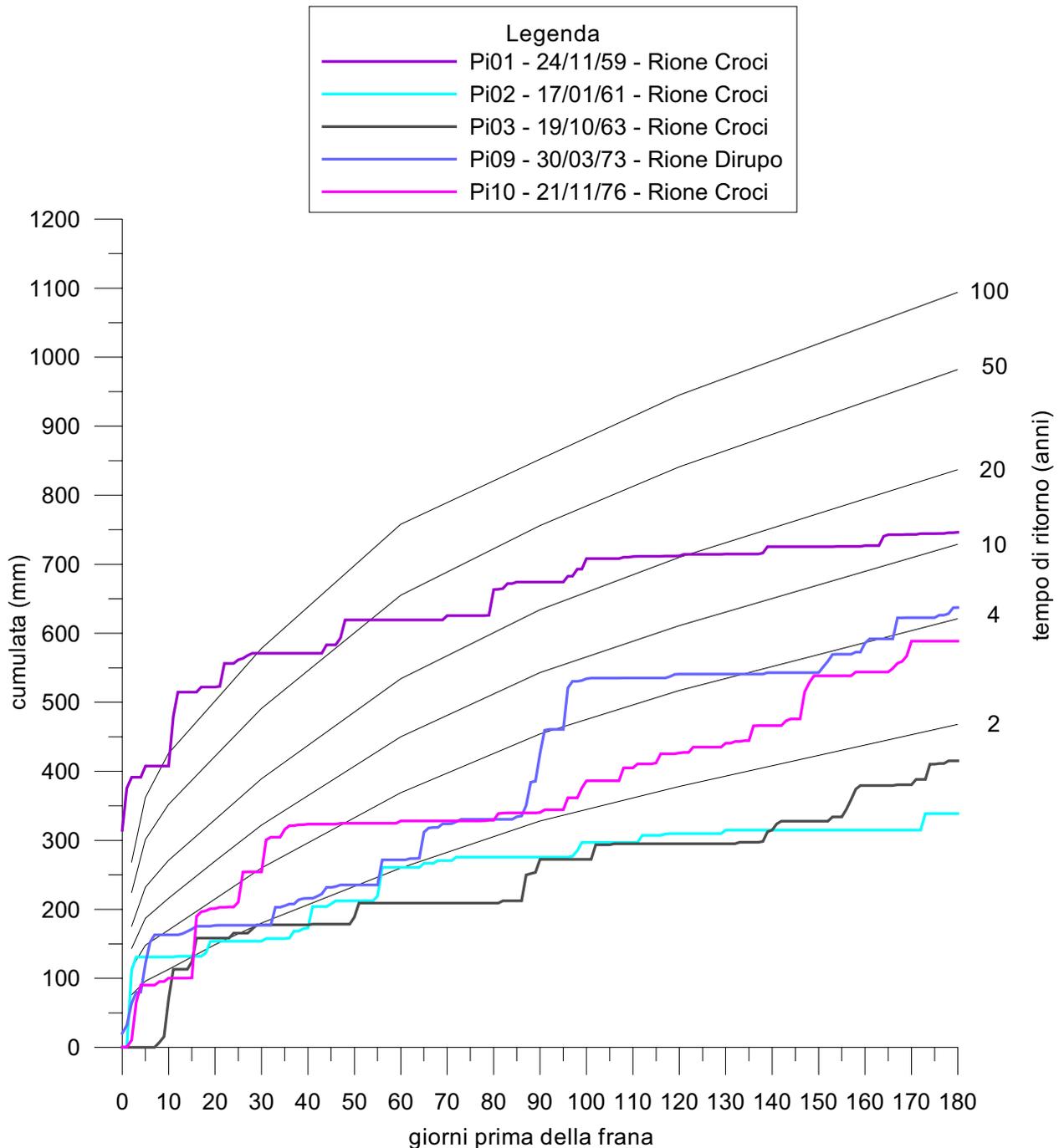


Figura 96. Confronto tra le curve di pioggia cumulata relative a diversi tempi di ritorno (calcolate tramite la GEV) e le curve di pioggia cumulata associate agli eventi franosi dei Rioni Croci e Dirupo.

frana, in cui la cumulata ha mostrato il più elevato tempo di ritorno (riportato in colonna VI) e il maggior valore assunto dalla variabile idrologica; nelle colonne VII e IX sono tabellate le medesime grandezze relative a periodi particolarmente piovosi entro i 180 giorni prima delle frane. In particolare nella colonna VII è riportata la durata del periodo, espressa in giorni, entro cui è calcolata la cumulata e in parentesi è indicato l'intervallo in giorni a partire dal giorno 0 della frana. Tali periodi, considerati *significativi per*

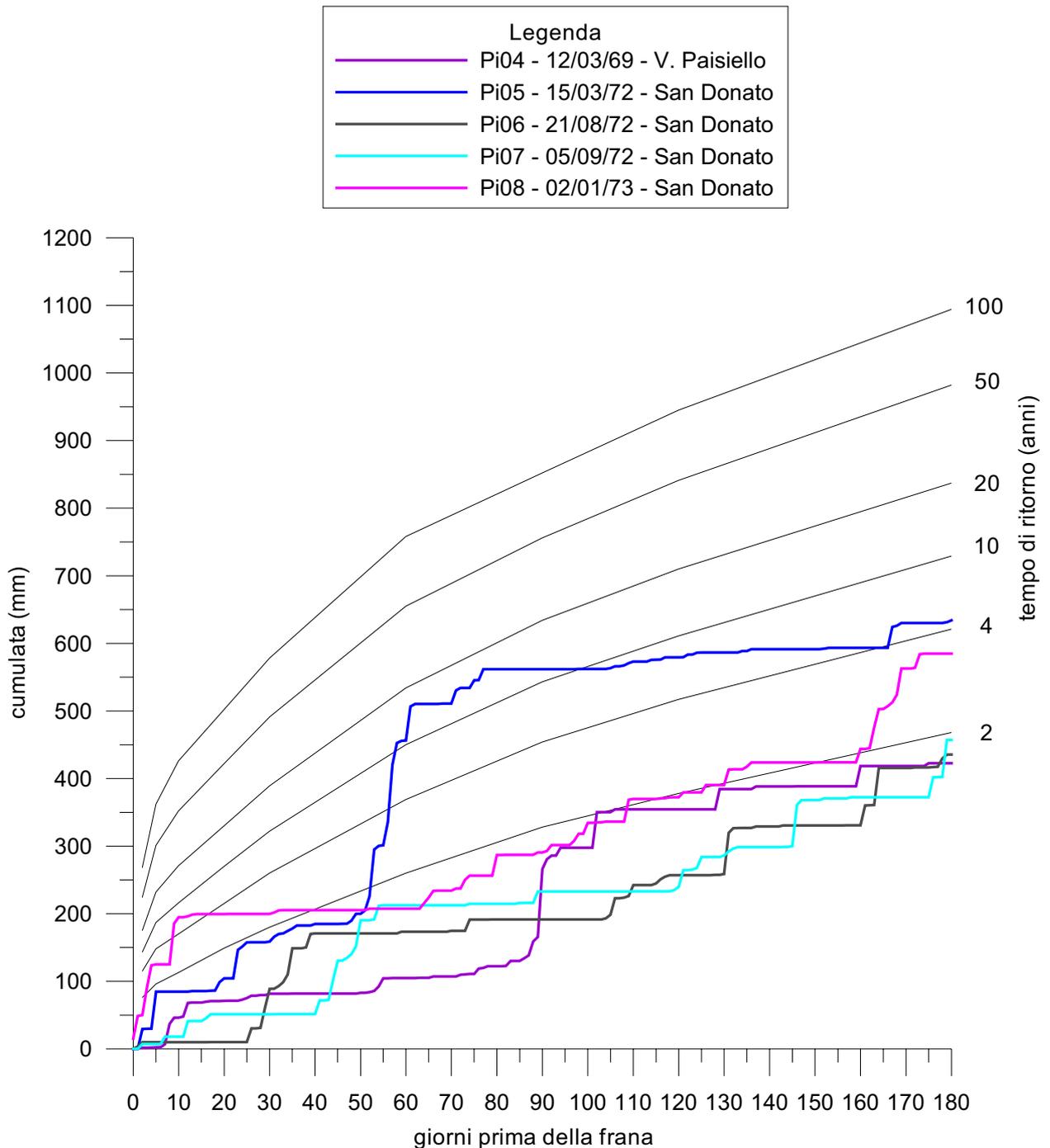


Figura 97. Confronto tra le curve di pioggia cumulata relative a diversi tempi di ritorno (calcolate tramite la GEV) e le curve di pioggia cumulata associate agli eventi franosi che hanno colpito le aree di San Donato e Via Paisiello.

*l'innescò* delle frane, si sono verificati sia in prossimità sia a distanza dell'evento franoso, come rilevabile dall'analisi delle figure 96 e 97. Il termine *significativo* è utilizzato in base a: 1) grado di eccezionalità (tempo di ritorno) degli eventi piovosi avvenuti nei mesi precedenti ai movimenti di massa; 2) posizione degli stessi rispetto al giorno dell'innescò dei movimenti.

Tabella 13. D (giorni): durata della cumulata *statisticamente significativa* calcolata a ritroso dalla data di accadimento del fenomeno franoso; Q (mm) = quantità di pioggia; T (anni) = tempo di ritorno. D' (giorni): durata della cumulata *significativa per l'innescò* dell'evento di frana; Q' (mm) = quantità di pioggia; T' (anni): tempo di ritorno..

Frana	Località	Data	D	Q	T	D' (*)	Q'	T'
Pi01	Rione Croci	24/11/59	29	570.9	>100	1(0°)	314.9	>100
Pi02	Rione Croci	17/01/61	4	131	>4	3(1°-3°)	130.8	>4
Pi03	Rione Croci	19/10/63	30	177.7	2-4	9(8°-16°)	158.4	2-4
Pi04	Via Paisiello	12/03/69	107	354.3	2-4	17(86°-102°)	220.1	4-10
Pi05	San Donato	15/03/72	78	561.9	10-20	15(48°-72°)	344.5	20-50
Pi06	San Donato	21/08/72	180	435.5	<2	15(26°-40°)**	150	2-4
Pi07	San Donato	05/09/72	180	457.1	<2	15(41°-55°)	150	2-4
Pi08	San Donato	02/01/73	14	199.6	4-10	15(0°-14°) 15(160°-174°)***	199.6 150	4-10 4-10
Pi09	Rione Dirupo	30/03/73	102	535	4-10	8(0°-7°)	163	4-10
Pi10	Rione Croci	21/11/76	37	321.4	4-10	28(0°-27°)	254.5	4-10

\* Periodo in cui si è verificato l'evento piovoso, calcolato a ritroso a partire dal giorno dell'innescò della frana (in giorni).

\*\* Soglia minima di innescò della frana San Donato (vedi prf. 4.5)

\*\*\* Vedi testo.

Occorre sottolineare che solo per un evento (Pi01) sono state registrate precipitazioni inusuali nello stesso giorno dell'innescò del fenomeno franoso, ma si tratta del ben noto caso dell'alluvione del 1959, il quale rappresenta un avvenimento talmente eccezionale che, probabilmente, andrebbe analizzato separatamente dagli altri.

Nel caso delle frane Pi01-Pi03, Pi09 e Pi10 (Rioni Croci e Dirupo), è evidente l'influenza di precipitazioni straordinarie avvenute in prossimità (fino a 27 giorni prima) dell'evento franoso (fig. 96).

Per quanto riguarda i settori di Via Paisiello e San Donato (fig. 97), le cumulate *significative per l'innescò* sono posizionate ad una distanza temporale dall'evento

franso compresa tra 26 e 102 giorni. Un caso particolare è rappresentato dalla Pi08: la cumulata *significativa per l'innescò* è certamente quella degli ultimi 14 giorni prima della frana, ma altrettanto si potrebbe affermare delle piogge comprese tra il 160<sup>esimo</sup> e il 174<sup>esimo</sup> giorno. Quest'ultimo periodo piovoso è lo stesso che provoca il brusco cambiamento di pendenza delle cumulate relative a Pi06 e Pi07. Un'attenta analisi del diagramma mette in luce, invece, il ruolo della cumulata *significativa* per l'evento Pi05. In effetti, i casi in questione (Pi05-Pi06) riguardano il periodo 1972-1973 durante il quale a partire dal 1 gennaio '72 (74<sup>esimo</sup> giorno della cumulata corrispondente a Pi05) sono state registrate copiose precipitazioni nell'arco dell'intero anno. È evidente dunque che le fenomenologie riscontrate nelle aree di Via Paisiello e San Donato risultano influenzate da episodi particolarmente piovosi posizionati anche in periodi molto lontani dal giorno dell'innescò.

#### 4.4.2 Pomarico

Le frane che soddisfano i requisiti richiesti per l'elaborazione statistica sono solo 6 del totale dei fenomeni individuati (fig. 37).

Allo scopo di individuare il carattere di eccezionalità delle piogge antecedenti ai movimenti franosi considerati è stato realizzato il diagramma di figura 98 che, insieme alla tabella 14, danno una visione completa del risultato ottenuto dall'elaborazione del modello. La lettura ed interpretazione della figura e della tabella citate, seguono le linee guida delineate nel paragrafo precedente.

Le elaborazioni dimostrano che nel caso della frana "La Salsa" l'innescò dei movimenti è statisticamente correlabile con precipitazioni cumulate su lunghi periodi (riattivazioni B e C) oppure (riattivazione D) con un evento piovoso a carattere eccezionale avvenuto circa 2 mesi prima della frana. In particolare nel caso B sono state registrate precipitazioni straordinarie in un solo giorno ( $171^\circ$ ,  $T > 100$ ), certamente riferibile all'alluvione del 1959, che non può essere considerato singolarmente alla base della riattivazione franosa.

Per quanto riguarda le frane denominate A, E e F, l'esame della figura 98 mostra chiaramente che gli eventi piovosi che potrebbero risultare significativi per l'innescò dei movimenti sono 2.

Nel caso A tali eventi sono risultati essere entrambi a carattere eccezionale (vedi tab. 14). Nel caso E è presente una cumulata in 45 giorni con  $T=2-4$  anni relativa ad un periodo che va dal  $91^\circ$  al  $135^\circ$  giorno prima della frana, successivamente a questo esiste un evento piovoso "ordinario" tra il  $29^\circ$  e  $48^\circ$  giorno (103 mm di pioggia; vedi fig. 98) che sommato al precedente potrebbe risultare quale causa innescante del fenomeno franoso. Analogamente le cumulate coniugate all'innescò della frana F sono: la prima, a carattere eccezionale, verificatasi tra il  $122^\circ$  ed il  $149^\circ$  giorno prima della frana, la seconda, "ordinaria", accaduta tra il  $48^\circ$  ed il  $69^\circ$  giorno (116.8 mm di pioggia) prima del movimento franoso. Riassumendo si è visto che in questi ultimi tre casi esaminati i fenomeni franosi possono essere correlati con la somma di due cumulate: la prima della durata compresa tra 28 (A ed E) e 45 giorni (F), la seconda variabile tra 14 e 22 giorni ed inoltre, non sempre, tali cumulate sono a carattere eccezionale.

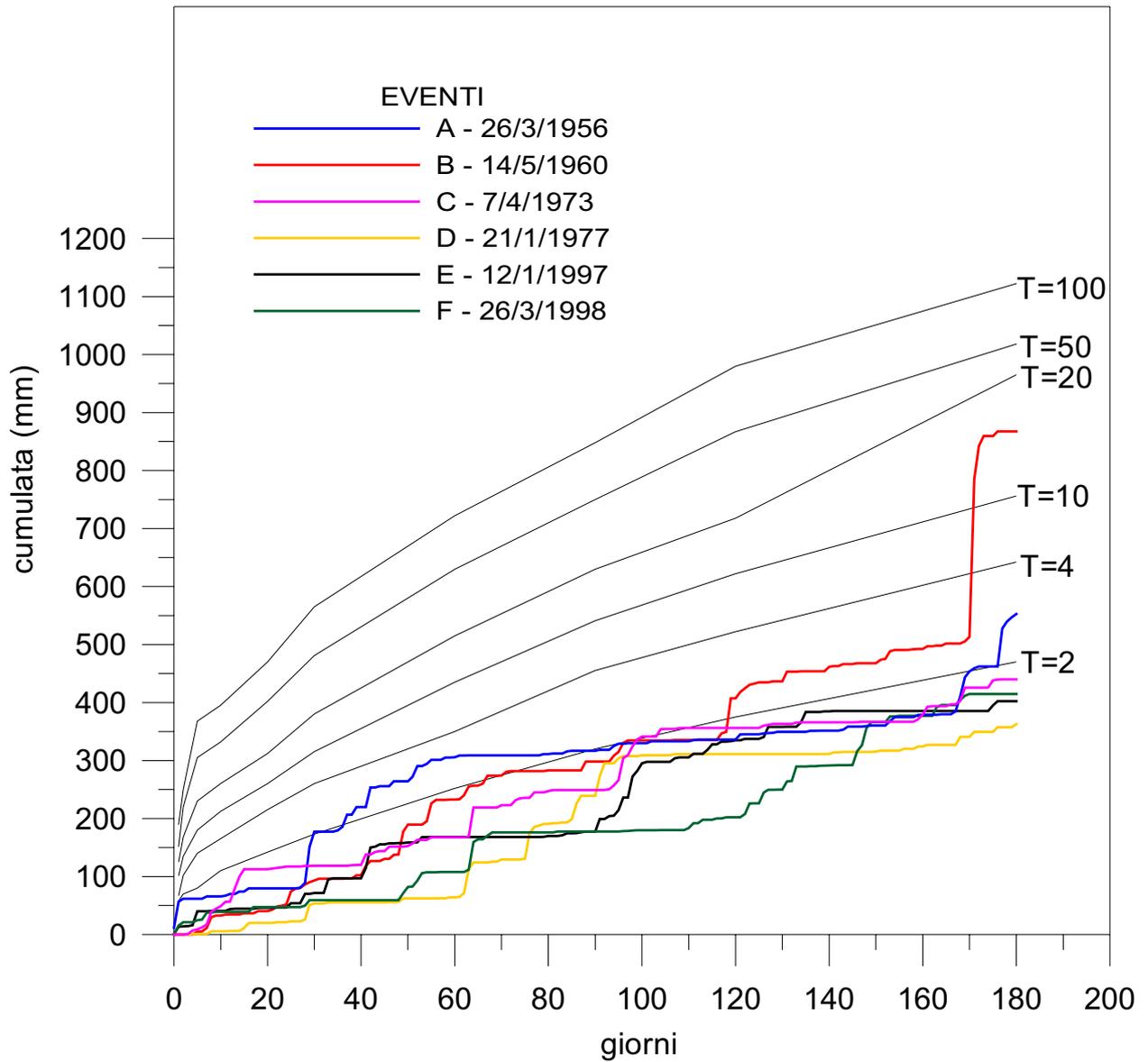


Figura 98. Confronto tra le curve di precipitazione cumulata relative a diversi tempi di ritorno e le curve di precipitazione cumulata associate a 6 eventi franosi.

Tabella 14. D (giorni) = durata della cumulata *statisticamente significativa* calcolata a ritroso dalla data di accadimento del fenomeno franoso; Q (mm) = quantità di pioggia; T (anni) = tempo di ritorno. D' (giorni): durata della cumulata *significativa per l'innescò* dell'evento di frana; Q' (mm) = quantità di pioggia; T' (anni): tempo di ritorno.

FRANA	LOCALITA'	DATA	D	Q	T	D'(*)	Q'	T'
A	Via V.Emanuele	26-3-1956	55	301.3	2-4	28 (28°-55°) 14 (167°-180°)	201.2 167.9	2-4 2-4
B	La Salsa	14-5-1960	173	859.6	10-20	172 (0°-171°) 1 (171°)	497 272	10-20 >100
C	La Salsa	7-4-1973	104	354.2	2-4	104 (0°-103°)	354.2	2-4
D	La Salsa	21-1-1977	96	307.8	<2	35 (62°-96°)**	235	2-4
E	Contrada Tempe	12-1-1997	101	297.7	<2	45 (91°-135°)	185	2-4
F	Masseria de Pascale	26-3-1998	149	366.2	<2	28 (122°-149°)	158.4	2

\* Periodo in cui si è verificato l'evento piovoso, calcolato a ritroso a partire dal giorno dell'innescò della frana (in giorni).

\*\* soglia minima di innescò della frana La Salsa (vedi prf. 4.5)

#### 4.4.3 Montalbano Jonico

Ai fini dell'elaborazione del modello idrologico-statistico per la collina di Montalbano J., sono stati scelti solo quei fenomeni franosi di cui sono esattamente note la data di accadimento, la localizzazione, la tipologia e le dimensioni. Tale dettaglio è stato possibile, con l'ausilio delle indagini in sito, delle foto aeree e della ricerca storico - scientifica, per 22 eventi (tab. 15). Si tratta principalmente di fenomeni poco profondi la cui tipologia e dinamica sono riportate nel paragrafo 2.5.

Viste la tipologia e le dimensioni delle frane, è stata posta grande attenzione a quanto avvenuto, in termini di piogge cumulate, nei periodi immediatamente precedenti ai fenomeni franosi trattati.

La figura 99 e la tabella 16 mostrano i risultati dell'analisi idrologico-statistica: per ogni evento di precipitazione-frana sono state calcolate le cumulate da 2 fino a 180 giorni a ritroso a partire dal giorno della/e attivazione/i. A questo proposito nell'analisi sono stati considerati come singoli eventi quei fenomeni che hanno subito attivazioni vicine nel tempo poiché spesso, dalle notizie di evento, non è stato possibile distinguere le fasi di inizio del movimento e il successivo collasso; in alcuni casi, infatti, documenti che attribuivano più attivazioni ravvicinate allo stesso fenomeno hanno fatto ipotizzare, piuttosto che a due fenomeni franosi distinti, un periodo in cui il versante ha mostrato segni di instabilità fino al collasso, che può essere avvenuto anche dopo un certo periodo dai primi fenomeni.

Per ogni cumulata coniugata a ciascun evento è stato calcolato il tempo di ritorno (T), quindi sono state considerate statisticamente significative (colonna D in tab. 16) quelle che presentavano un T maggiore di 2 anni. Si può notare che in nove casi (60% del totale) le piogge cumulate nel periodo antecedente al fenomeno franoso non mostrano il minimo grado di eccezionalità:  $T=1$ . Questo indica che nel 60% dei casi tutte le cumulate calcolate possono essere considerate piogge ordinarie che possono verificarsi mediamente ogni anno e quindi non possono essere considerate statisticamente significative.

Negli eventi 4, 5, 10, 11, 13 e 15 (40% del totale) corrispondenti alle frane Mo2, Mo3, Mo5, Mo6, Mo8, Mo10 e Mo11 sono state individuate cumulate significative per l'innescò dei movimenti. Tali eventi di frana sono occorsi nei periodi alluvionali di figura 92. In quattro casi (eventi 4, 10, 13 e 15) esiste una evidente corrispondenza tra le frane e le piogge immediatamente precedenti al collasso. Negli eventi 5 e 11 tale

Tabella 15. Data, dimensioni e danni degli eventi franosi trattati nella modellazione. L'ubicazione delle frane è in figura 45.

Frana	Data gg/mm/aa	Larghezza della superficie di rottura (m)	Profondità della superficie di rottura (m)	Area della frana (m <sup>2</sup> )	Area della superficie sommitale dislocata (m <sup>2</sup> )	Massima retrogressione del plateau sommitale (m)	Danni
Mo1	26/11/52	68	-	5000	380	12	Strada comunale
Mo2	22/06/57 23/09/57 09/10/57	54	-	5560	160	5	Muro di sostegno, strada comunale, 29 edifici lesionati, 350 persone evacuate
Mo3	04/04/60 07/04/60 24/04/60	50	-	2700	137	4	Muro di sostegno, strada comunale
Mo4	17/03/61 30/05/61 25/11/61 29/01/62	38	-	2120	137	4	Muro di sostegno lesionato, strada comunale
Mo5	06/11/62 12/08/76	33	6	1200	298	13	Alcuni edifici lesionati, strada comunale, 100 persone evacuate
Mo6	29/03/69	27	10	1740	85	6	Strada comunale, alcuni edifici lesionati, 200 persone evacuate
Mo7	04/01/71	38	3	1550	79	4	Muro di sostegno, strada comunale, 5 edifici lesionati
Mo8	25/01/72	90	6	6300	-	-	Strada comunale, alcuni edifici lesionati, 300 persone evacuate
Mo9	11/10/72	101	11	5250	915	15	-
Mo10	02/01/73 26/02/73	27	11	650	271	10	Alcuni edifici lesionati, muro di sostegno, strada comunale
Mo11	05/01/73	60	6	3490	330	5	Muro di sostegno, strada comunale, alcuni edifici lesionati
Mo12	08/02/73	22	5	790	21	3	Serbatoio dell'acqua, strada comunale, muro di sostegno
Mo13	10/09/76	21	3	390	103	7	Muro di sostegno, strada comunale

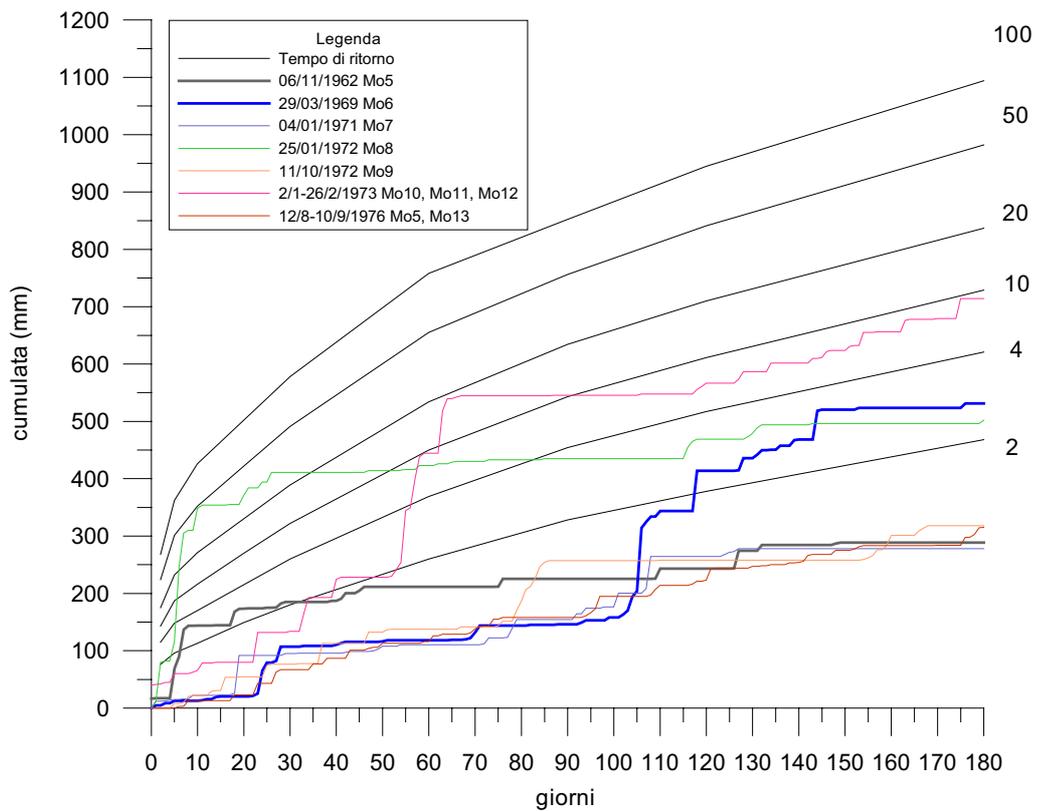
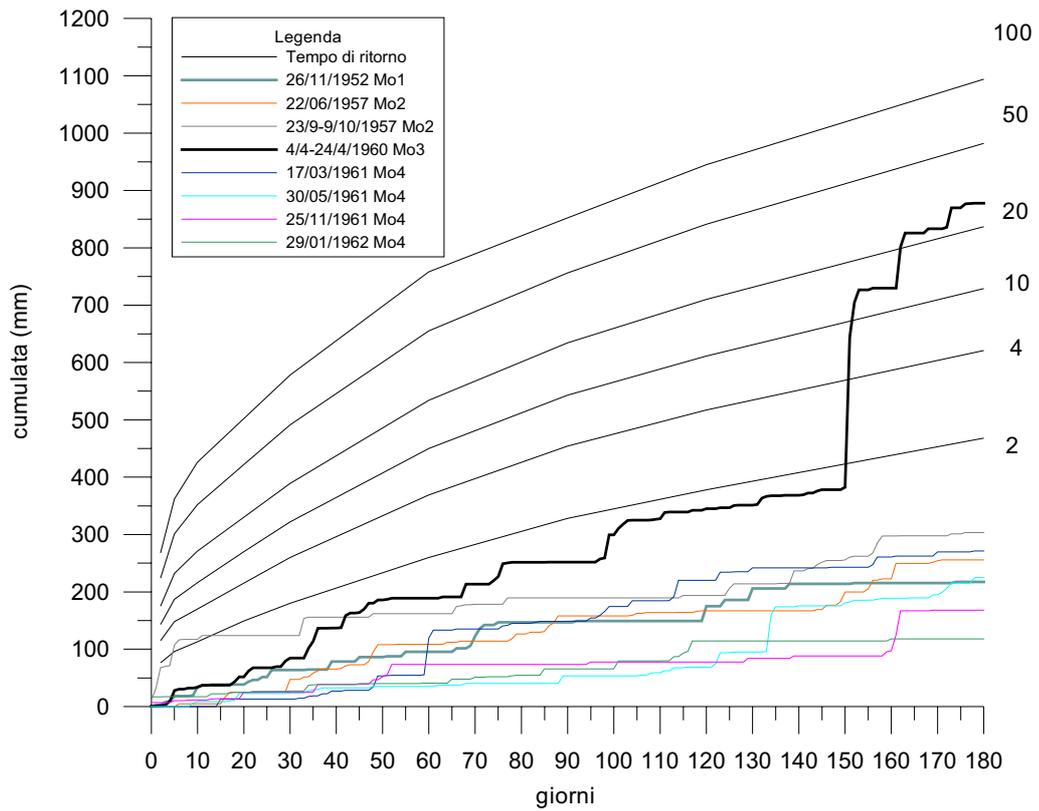


Figura 99. Confronto tra le curve di precipitazione cumulata relative a diversi tempi di ritorno e le curve di precipitazione cumulata associate agli eventi franosi di Montalbano Jonico.

Tabella 16. Tempi di ritorno (T, anni) e durata (D, giorni) delle piogge cumulate statisticamente significative.

Evento	Data	Frana	T	D
1	17/10/1944	Mo0	Dati di pioggia non disponibili	-
2	26/11/1952	Mo1	1	-
3	22/6/1957	Mo2	1	-
4	23/9-9/10/1957	Mo2	1÷5	10
5	4/4-24/4/1960	Mo3	10÷20	180
6	17/3/1961	Mo4	1	-
7	30/5/1961	Mo4	1	-
8	25/11/1961	Mo4	1	-
9	29/1/1962	Mo4	1	-
10	6/11/1962	Mo5	1÷5	10
11	29/3/1969	Mo6	1÷5	120 ÷ 180
12	4/1/1971	Mo7	1	-
13	25/1/1972	Mo8	>20	10÷30
14	11/10/1972	Mo9	1	-
15	2/1-26/2/1973	Mo10, Mo11, Mo12	10÷20	5÷20*
16	12/8-10/9/1976	Mo5, Mo13	1	-

(\*) T > 20 anni per D = 10.

corrispondenza non esiste in quanto i valori più elevati di T sono stati assunti dalle cumulate tra 120 e 180 giorni. In particolare l'elevato periodo di ricorrenza dell'evento 5 è dovuto all'eccezionale valore registrato in un giorno piovoso (25/11/59, 262 mm); se si considera l'intervallo tra questo e la data di evento, l'influenza della cumulata a 180 giorni perde di significato. Inoltre le caratteristiche stesse delle frane considerate (modesta profondità delle masse coinvolte e la loro litologia) possono far ipotizzare un limitato impatto sulla stabilità dei pendii di Montalbano di piogge cumulate su lunghi periodi. Va sottolineato che quanto appena asserito è basato sulle conoscenze generali del ruolo delle piogge in fenomeni franosi poco profondi; rimane comunque l'incertezza, espressa dai primi risultati (vedi par. 4.1) dell'analisi statistica, degli effetti a lungo termine degli eventi idrologici a carattere eccezionale sulla stabilità dei versanti.

#### 4.5 Pericolosità di frana: il modello soglia "modificato"

Il modello soglia prospettato nel paragrafo 1.2.1.1 è apparso sin dall'inizio inadeguato per la valutazione della probabilità di innesco di frana a causa di piogge. È evidente che una determinata frana, di cui si vuole determinare la pericolosità, può essere stata sottoposta più volte, nel corso della sua storia evolutiva, a condizioni pluviometriche pari, o anche maggiori, al valore soglia determinato e che soltanto in alcuni di questi casi, si sia realmente mobilizzata. Pertanto ritengo opportuno che, sulla base delle notizie storiche di attivazione del fenomeno franoso, si stabilisca quale sia la probabilità che i due eventi, superamento della soglia e innesco del movimento, si verifichino insieme. In altre parole l'imposizione che per valori maggiori della soglia scelta la probabilità di evento sia pari a 1 (eq. 6) non è corretta se applicata alle frane; essa rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente per l'innesco di fenomeni franosi. Infatti, una volta superato il valore soglia ( $Y \geq Y_s$ ) non c'è la certezza che la frana si inneschi, bensì è possibile calcolare la probabilità di innesco.

Se indichiamo con  $A$  l'evento superamento della soglia e con  $B$  l'evento innesco del fenomeno franoso, la probabilità di verificarsi insieme è data da:

$$\text{Eq. 26} \quad P[A \cap B] \equiv P[A]P[B|A]$$

In parole, l'eq. 27 ci dice che la probabilità di verificarsi di entrambi gli eventi  $A$  e  $B$  è uguale alla probabilità di  $A$  moltiplicata la probabilità che  $B$  si verifichi quando si supponga che  $A$  si sia già verificato. Con ( $P[B|A]$ ) è indicata la *probabilità di  $B$  condizionata ad  $A$*  cioè la probabilità che si verifichi  $B$  supposto che si sia verificato  $A$ . Tale probabilità è ricavabile in base all'osservazione della frequenza delle riattivazioni di frana a seguito di precipitazioni cumulate pari, o superiori, alla soglia individuata.

Quindi la pericolosità in un numero  $N$  di anni è:

$$\text{Eq. 27} \quad H(N) = 1 - (1 - P[A \cap B])^N$$

e la pericolosità annuale è:

$$\text{Eq. 28} \quad H(1) = P[A \cap B] \equiv P[A]P[B|A]$$

Di seguito si mostrano i risultati sulla valutazione della pericolosità annuale relativa alle frane di San Donato e La Salsa.

Nel caso di San Donato in base alle informazioni desunte dalla figura 97 e dalla tabella 13, si è stabilita la soglia minima di innesco di 150 mm cumulati in 15 giorni che

rappresenta il valore minimo delle cumulate *significative per l'innescò* (evidenziato in giallo nella colonna Q' di tab. 13) dei fenomeni franosi di San Donato. La figura 100 mostra graficamente la modalità di scelta della soglia: il tratto della curva Pi06 evidenziato in figura rappresenta il valore minimo tra gli eventi piovosi riferibili alle riattivazioni di frana; da qui l'attribuzione di soglia minima di innescò. A tale valore corrisponde una probabilità di accadimento, calcolata secondo la GEV (vedi prf. 4.3), pari a 0.38 ( $P[A]$ ). Il tempo di ritorno, calcolato con l'eq. 9, è circa 2,6 anni. Se ci riferiamo all'intervallo di tempo 1950-1987, periodo per il quale sono più numerose e più affidabili le notizie di eventi franosi provenienti dall'analisi storica, il valore di cumulata considerato si è verificato circa 14 volte. Dalla figura 97 è facile dedurre che per un valore simile, o superiore, di pioggia cumulata la frana si è innescata 4 volte; pertanto la probabilità di innescò della frana di San Donato in relazione al valore della variabile idrologica considerata è pari a  $4/14$  ( $P[B|A]$ ). Quindi il valore della pericolosità annuale è, in base alla eq. 28, pari a 0,10. Questo valore di pericolosità, espresso come tempo di ritorno, fornisce un valore tra 9 e 10 anni che corrisponde ad una pericolosità tra elevata e molto elevata secondo Fell (1994) (tab. 1).

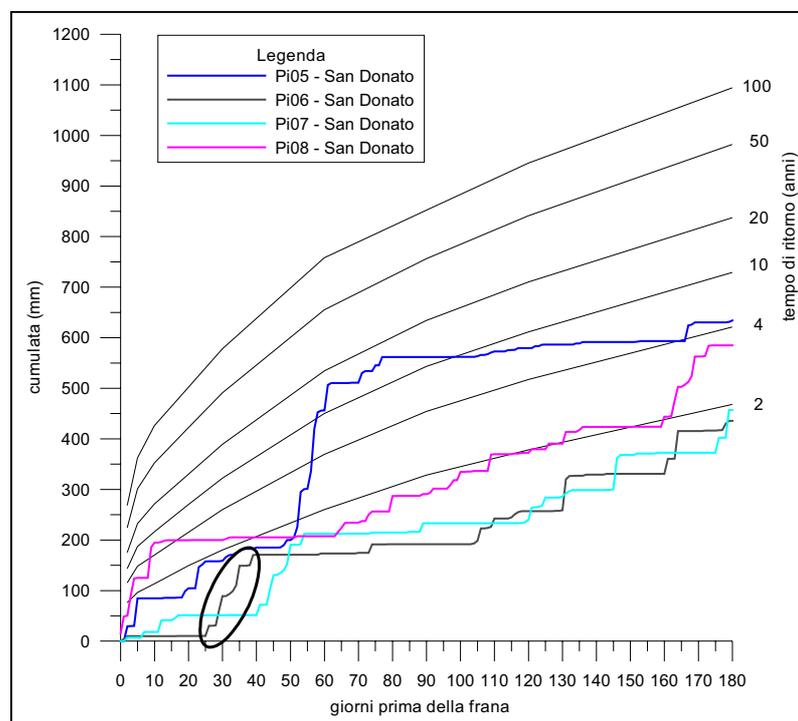


Figura 100. Rappresentazione grafica della modalità di scelta della soglia per il caso di San Donato (Pisticci).

Nel caso di Pomarico, adottando lo stesso criterio utilizzato per San Donato, la soglia minima di innescò è stata desunta dalla figura 98 e dalla tabella 14 (vedi anche la

rappresentazione grafica di fig. 101); si è stabilita una soglia di 230 mm cumulati in 35 giorni che rappresenta il valore minimo tra le cumulate *significative per l'innescò* (evidenziato in giallo nella colonna D' di tab. 14) dei fenomeni franosi del versante "La Salsa". A tale valore di soglia corrisponde una probabilità di accadimento pari a 0,5 ( $P[A]$ ). Il tempo di ritorno è, quindi, 2 anni. Se ci riferiamo allo stesso intervallo temporale del caso precedente, il valore di cumulata considerato si è verificato circa 18 volte. Dalla figura 98 si deduce che per un valore simile, o superiore, di pioggia cumulata la frana si è innescata 3 volte. Per cui la probabilità di innescò della frana "La Salsa" in relazione al valore della variabile idrologica considerata è pari a  $3/18$  ( $P[B|A]$ ). Quindi il valore della pericolosità annuale è 0.08, valore del tutto congruente con il caso di Pisticci.

Un'ultima considerazione riguarda la scelta della soglia: è stato adottato un criterio assolutamente conservativo, infatti è stato scelto il valore minimo di cumulata correlabile all'innescò del movimento di versante considerato. Tale cumulata, inoltre, corrisponde ad eventi di precipitazione avvenuti alla fine della stagione invernale o in seguito a periodi particolarmente piovosi.

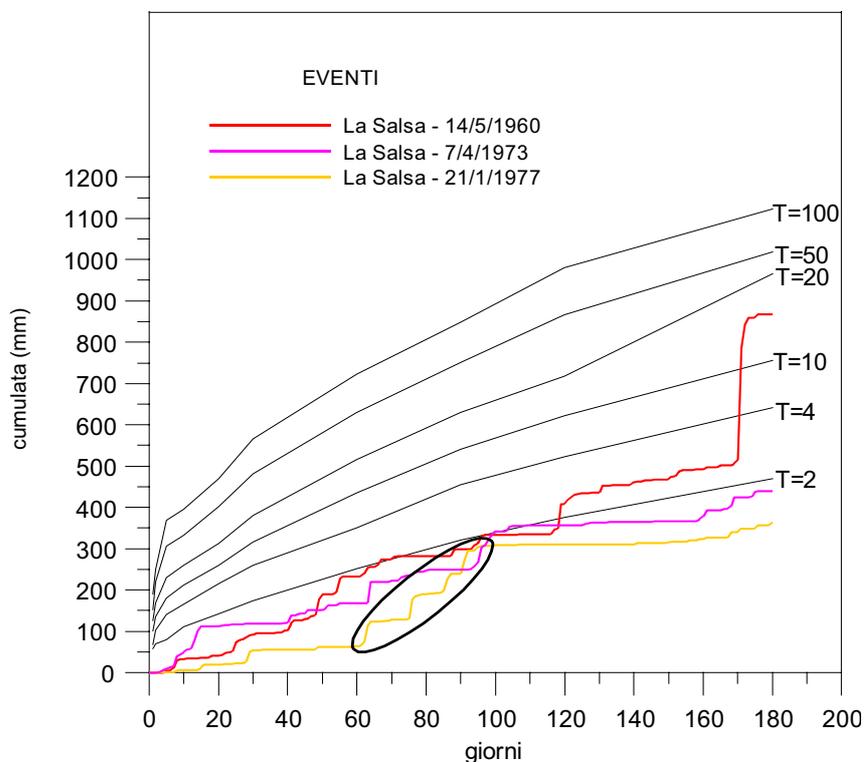


Figura 101. Rappresentazione grafica della modalità di scelta della soglia per il caso della frana La Salsa (Pomarico).

## Capitolo 5 - Discussione ed applicazione dei risultati

### 5.1 Il caso di Pisticci

Il principale elemento di peculiarità dell'assetto geologico della collina di Pisticci è rappresentato dalla presenza di spesse coperture detritiche di origine franosa ed eluviale/colluviale lungo i versanti. Tali coltri sono sede di un'attiva circolazione sotterranea che provoca periodiche condizioni di instabilità.

Di notevole interesse risultano, quindi, le condizioni idrogeologiche locali: la presenza di sorgenti al contatto tra i depositi sommitali e le sottostanti Argille e al contatto tra le coperture prevalentemente sabbiose/limose e quelle prevalentemente argillose e/o le Argille rivelano la presenza di falde acquifere di modesto spessore contenute in tali depositi. Le direzioni del flusso sotterraneo sono condizionate dai seguenti elementi: granulometria dei depositi e loro variabilità spaziale, andamento dei limiti di flusso e delle discontinuità tettoniche, distribuzione areale delle coltri detritiche lungo i fianchi dei pendii e grado morfo-evolutivo dei versanti (vedi fig. 22, prf. 2.1.3).

Le indagini geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche condotte sulla collina di Pisticci hanno permesso di individuare due principali tipologie di instabilità di pendio.

La prima è quella di movimenti franosi complessi (scorrimenti roto-traslazionali, colate) a carattere spiccatamente retrogressivo nelle quali il movimento, prevalentemente rotazionale, avviene lungo superfici di neoformazione sub-circolari. Tali superfici, profonde fino a 40 m, attraversano principalmente i depositi del terrazzo marino e la parte sommitale delle Argille grigio-azzurre. Le frane riconducibili a questa tipologia, pur essendo ben rappresentate nell'intera Fossa Bradanica, mostrano, in base ai dati a disposizione, tempi di ritorno plurisecolari per una stessa area.

La seconda tipologia è relativa a fenomeni estremamente complessi (versante di San Donato, fig. 27, prf. 2.3), infatti, in più parti delle zone franose, principalmente alla testata, sono riconoscibili indizi di movimenti per scorrimento rotazionale e le superfici sub-circolari appaiono coinvolgere i depositi marini terrazzati, le Argille in posto e, lungo il versante, le coperture detritiche. Tuttavia il movimento è prevalentemente costituito nella zona media e di valle da una serie di scivolamenti lungo una o più superfici parallele al pendio: le superfici di scivolamento sono posizionate in corrispondenza del limite argilla in posto – copertura detritica di frana (20-30 m di profondità) e dislocano principalmente quest'ultima. La dinamica di questa tipologia di fenomeni franosi,

deducibile anche con l'ausilio delle foto aeree, consiste, quindi, in una periodica riattivazione del movimento nella parte bassa dei versanti che induce condizioni di instabilità nelle zone di monte.

La dinamica osservata è risultata assimilabile a numerosi altri casi riportati in letteratura circa movimenti franosi localizzati in ambienti di avanfossa appenninica. L'ampia diffusione di tali fenomeni e la loro elevata frequenza, sono stati alla base dei successivi approfondimenti della Tesi di Dottorato.

Le simulazioni effettuate con il codice di calcolo FLAC per il versante "campione" di San Donato sono risultate idonee nella ricostruzione della dinamica del fenomeno franoso che ha prodotto in superficie gli effetti riconosciuti sia sulla base dei rilevamenti di campagna e dei dati di letteratura sia dall'analisi delle foto aeree. Le simulazioni in presenza di flusso, la cui caratterizzazione ha rispecchiato le condizioni reali deducibili dai dati a disposizione, hanno consentito, inoltre, di valutare l'azione destabilizzante prodotta dalla filtrazione in relazione alla posizione ipotizzata della falda.

Per quanto riguarda l'analisi idrologico-statistica, dato l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dei versanti di Pisticci e Pomarico, questi sono stati trattati diversamente dal caso di Montalbano Jonico. Infatti, facendo riferimento alle informazioni provenienti dal modello completo di versante ed in particolar modo ai caratteri di circolazione ipogea, in questi casi sono state ritenute potenzialmente *significantive* per l'innescio dei movimenti di versante le piogge cumulate in periodi anche molto a ritroso rispetto alle attivazioni di frana.

L'analisi statistica ha messo in evidenza quanto segue: a) esiste una stretta relazione tra le frane di Pisticci e le condizioni pluviometriche connesse al periodo precedente all'innescio; b) le cumulate *significantive* per l'innescio dei movimenti ricadono principalmente in periodi piovosi che notoriamente hanno provocato effetti alluvionali in Basilicata e la cui probabilità di occorrenza può essere espressa in termini di tempo di ritorno; c) i diversi tempi di risposta dei settori della collina di Pisticci a condizioni pluviometriche critiche riflettono le sostanziali diversità geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche riconosciute.

In ultima analisi, allo scopo di accertare la corrispondenza tra gli effetti peggiorativi ipotizzati nelle simulazioni numeriche ed il valore di soglia individuato negli studi idrologico-statistici (150 mm di pioggia cumulata in 15 giorni), sono stati analizzati i dati del monitoraggio di Pisticci (prf. 2.6.1).

La figura 102 riporta i valori assunti dalla variabile idrologica pioggia cumulata in 15 giorni nel periodo in cui sono state registrate le variazioni delle pressioni dell'acqua nel sottosuolo. Si vede che il valore soglia individuato per la frana di San Donato è stato superato 1 volta in tutto il periodo del monitoraggio (1992-1995). A tale superamento è corrisposto un forte innalzamento del livello piezometrico (fino a 20 m); va tenuto presente, però, che l'innalzamento si è verificato circa tre mesi dopo il superamento della soglia e che in questo lasso di tempo si sono verificati ulteriori eventi piovosi "ordinari".

Si ipotizza dunque che il superamento della soglia individuata sia pertanto in grado di generare sostanziali incrementi delle pressioni interstiziali; da qui gli ovvi effetti negativi sulla stabilità dei versanti.

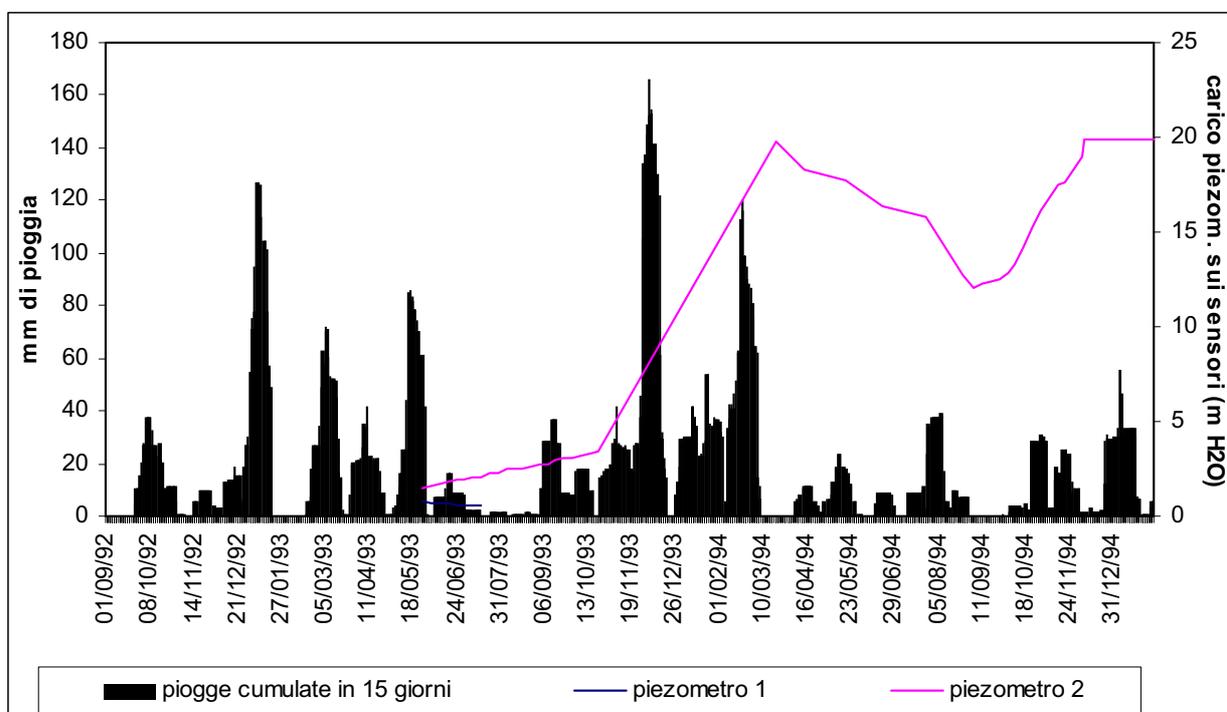


Figura 102. Confronto tra le misure piezometriche registrate dal sistema di monitoraggio di Pisticci (prf.2.6.1) nel periodo settembre 1992 - febbraio 1995 e i valori assunti dalla variabile idrologica pioggia cumulata in 15 giorni nello stesso periodo.

## **5.2 Il caso di Pomarico**

Le indagini svolte hanno evidenziato una stretta analogia con l'esempio della collina di Pisticci. Di conseguenza, per l'area di Pomarico valgono le considerazioni, fatte nel paragrafo precedente, sulle condizioni geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche predisponenti alla franosità. Tale affermazione certamente conforta la possibilità di generalizzare i risultati della sperimentazione su una data area all'intero bacino di avanfossa, a patto che venga verificata la similitudine tra i fattori che partecipano alla franosità.

Nel caso di Pomarico, gli approfondimenti della modellazione hanno riguardato il versante franoso della "Fontana Salsa" (vedi fig. 31, prf. 2.4). Anche in questo caso si è manifestata un'ottima corrispondenza tra i meccanismi di movimento e di innesco del fenomeno franoso simulati e quelli ipotizzati in base ai rilevamenti di campagna, ai dati di letteratura e all'interpretazione delle foto aeree; tali risultati hanno, altresì, evidenziato la stretta analogia con il versante franoso di San Donato (Pisticci).

Le simulazioni numeriche hanno dimostrato che il versante si presenta stabile in assenza di flusso. Al contrario i modelli con flusso hanno evidenziato l'esistenza di un meccanismo di scorrimento prevalentemente traslazionale che, a partire dalla base del pendio, si espande lungo tutto il corpo di frana in relazione alla posizione ipotizzata della falda acquifera.

L'analisi idrologico-statistica, condotta sulla falsa riga del caso della frana di San Donato (Pisticci), ha restituito un valore di pericolosità annua del tutto congruente, come ci si aspettava, con il caso di Pisticci.

La verifica degli effetti della soglia sulla stabilità della frana La Salsa è possibile, in via del tutto qualitativa, sulla base dei dati di monitoraggio a disposizione. I primi dati della stazione di monitoraggio Poma1 (prf. 2.6.2), a causa del limitato intervallo di misure, mostrano che il valore soglia, in tale intervallo, non è stato mai superato (fig. 103) e quindi non si è quantitativamente in grado di definire quale variazione piezometrica ci sia da attendersi dal superamento della soglia. Comunque, sulla base delle correlazioni piogge-pressioni interstiziali provenienti dai monitoraggi di Pisticci e di Pennabili (prf. 2.6), si è potuta accertare la corrispondenza tra le condizioni di filtrazione peggiorative della stabilità del versante simulate nella modellazione numerica e i valori soglia delle precipitazioni individuate nella modellazione idrologico-statistica.

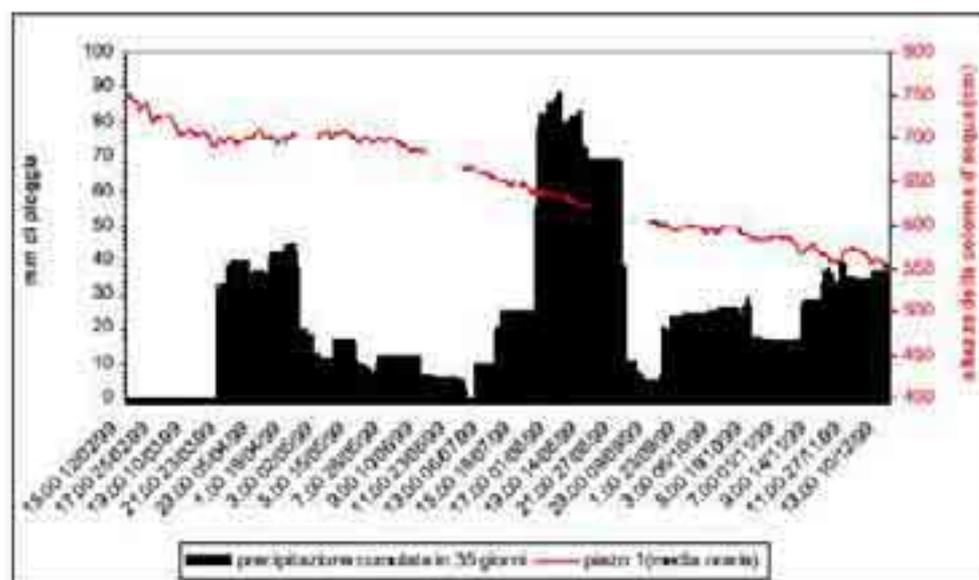


Figura 103. Confronto tra le misure piezometriche registrate dal sistema di monitoraggio di Pomarico (prof. 2.6.2) nel periodo febbraio 1999 - dicembre 1999 e i valori assunti dalla variabile idrologica pioggia cumulata in 35 giorni nello stesso periodo.

Lo studio statistico degli altri fenomeni di instabilità di Pomarico (tre dei sei casi esaminati) ha messo in evidenza che gli eventi piovosi collegati all'innescarsi dei movimenti possono essere più di uno. Tale dato conferma la necessità di considerare, nello studio delle relazioni piogge - frane, precipitazioni cumulate in periodi molto lunghi, cercando di individuare tutte le possibili combinazioni tra le variabili idrologiche. In alcuni casi, inoltre, gli eventi piovosi che si combinano sono "ordinari" e, quindi, di difficile individuazione attraverso l'utilizzo di tecniche statistiche simili a quelle utilizzate nel modello probabilistico della presente Tesi.

Il modello "soglia modificato" risulta certamente valido anche nei casi sopra citati a condizione che si ponga grande attenzione sulla scelta della variabile idrologica riferita all'innescarsi delle frane. Tale scelta, in alcuni casi, non può essere dettata solo da un criterio di valutazione basato sul grado di eccezionalità dell'evento pluviometrico.

### **5.3 Il caso di Montalbano Jonico**

La collina di Montalbano è stata scelta come esempio di area interessata da frane poco profonde. Le frane individuate, classificate come rapidi scorrimenti - crolli di terra, retrogressivi e in allargamento, sono caratterizzate da una modesta intensità (pericolo o magnitudo), ma la loro elevata frequenza implica un alto grado di pericolosità (probabilità di occorrenza). Conseguentemente il grado di rischio è molto elevato come testimoniato anche dai danni che ciascun fenomeno ha provocato (vedi tab. 15, prf. 4.4.3).

L'utilizzo di metodi numerici nella modellazione dell'instabilità dei versanti si è dimostrato in grado di simulare la dinamica dei fenomeni franosi che interessano i bordi dell'abitato. Infatti, i meccanismi evidenziati nella modellazione appaiono coerenti con le dinamiche ipotizzabili sulla base delle indagini di campagna, delle analisi delle foto aeree e dei dati storico - scientifici.

In ogni caso, il modello ha ben evidenziato che le condizioni di precaria stabilità dei versanti sono strettamente legate all'assetto geologico - geomorfologico della collina. Occorre sottolineare che i risultati ottenuti suggeriscono l'approfondimento di studi e sperimentazioni sulla caratterizzazione geomeccanica dei materiali ed in particolare su alcuni fenomeni transitori che possono giocare un ruolo fondamentale nelle instabilità quali la presenza e l'annullamento di pressioni interstiziali negative nelle zone non sature. Allo stato attuale non è stato potuto simulare questo fenomeno nelle analisi eseguite.

Lo studio idrologico-statistico ha evidenziato che le frane di Montalbano, nel caso in cui esista una correlazione con le piogge, sono influenzate da cumulate fino a 30 giorni prima dell'evento. Tale evidenza è consistente con le geometrie e i caratteri idrogeologici delle masse dislocate (il loro spessore massimo è di circa 11 m e i materiali coinvolti sono principalmente i depositi sommitali).

In definitiva, l'analisi delle variabili idrologiche collegate all'innesco delle frane, ha mostrato che l'influenza delle piogge è generalmente moderata. Tuttavia, gli studi a carattere geomorfologico hanno fatto risaltare l'importanza della segnalazione di alcuni indizi di instabilità (fenomeni "premonitori") nella previsione dei movimenti: quando questi sono presenti, il peso di piogge cumulate a carattere eccezionale sul successivo collasso franoso è risultato tra il 30% e il 40%.

Va tenuto presente che i "numeri" dell'elaborazione probabilistica vanno confrontati con le informazioni ottenute dal modello completo di versante: combinando i risultati dei due modelli, ci si rende conto che lo scenario geologico di Montalbano è altamente predisposto alla franosità per cui è possibile una connessione tra le numerose frane censite e condizioni idrologiche cosiddette "ordinarie". Tutto ciò conferma la necessità di analizzare fenomeni naturali complessi quali le frane, con l'ausilio di metodologie appartenenti a diverse discipline scientifiche.

L'elevato grado di franosità della collina di Montalbano J. (ben 58 frane negli ultimi 50 anni) e il puntuale coinvolgimento di strutture e infrastrutture antropiche nei franamenti, hanno suggerito, inoltre, un approfondimento sull'incidenza del fattore antropico nei fenomeni di instabilità. Tale studio dà indicazioni anche sulla possibilità di individuare il campo di impiego delle serie storiche di frana, costruite in genere in base ai dati dei centri abitati, per analisi previsionali estese ad aree non urbanizzate.

L'utilizzo di metodologie classiche (analisi ed interpretazione delle foto aeree) e di recente acquisizione (tecnologie GIS) nel campo delle Scienze della Terra ha permesso il confronto di quanto è avvenuto in termini di movimenti di versante nel periodo 1947-1987 in corrispondenza dell'area di Montalbano Ionico e di quella di Tempa Rossa (comune di Pisticci) (figg. 104 e 105), contraddistinte da un diverso grado di urbanizzazione: elevato la prima, di fatto trascurabile la seconda.

L'omogeneità dei caratteri geologici, geomorfologici, geomeccanici, climatici e idrogeologici e i diversi livelli di antropizzazione delle due aree sono stati alla base del confronto.

I risultati ottenuti evidenziano un grado di franosità quasi due volte maggiore (tab. 17) per la zona urbanizzata nell'intero periodo considerato e una differenza nella distribuzione di attività e nelle dimensioni dei fenomeni franosi registrati per le due aree; infatti, i movimenti di versante che hanno colpito il centro abitato di Montalbano risultano essere dimensionalmente maggiori e mostrano un carattere più spiccatamente retrogressivo rispetto a quelli di Tempa Rossa (confronta fig. 45, prf. 2.5, e fig. 106).

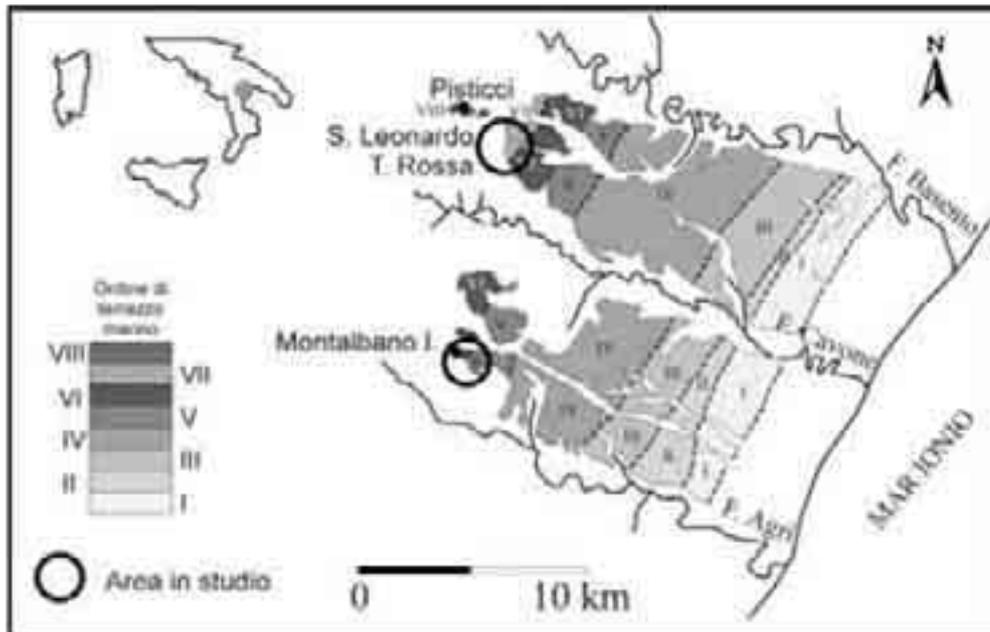


Figura 104. Ubicazione delle aree oggetto di confronto e rappresentazione schematica dei depositi marini terrazzati.



Figura 105. Modello digitale del terreno: collina di Tempa Rossa.

Tabella 17. Confronto tra il numero di eventi di frana che hanno colpito la collina di Montalbano Jonico nel periodo 1947-1987 e quelli dell'area non urbanizzata di Tempa Rossa - San Leonardo (Pisticci).

Periodo	N. di frane (Montalbano Jonico, perimetro=2.5 km)	N. di frane (T. Rossa, perimetro=2.46 km)
1947-55	8	1
1955-67	13	6
1967-72	6	7
1972-77	13	9
1977-87	8	2
Totale	48	25
n.frane/km di perimetro	19.2	10.6

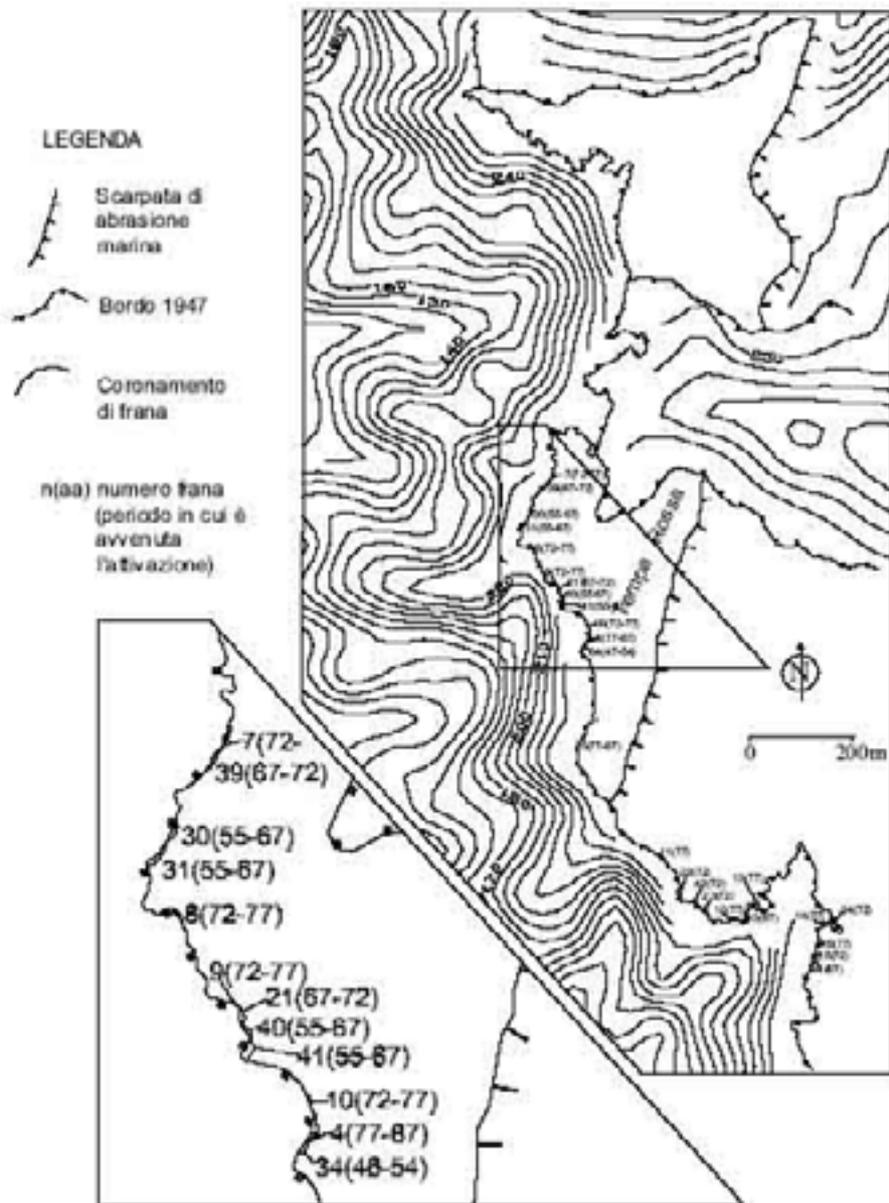


Figura 106. Carta dei movimenti di versante della collina di Tempa Rossa.

## Capitolo 6 - Considerazioni conclusive

Il primo importante dato che emerge dallo studio svolto riguarda la stretta relazione tra la riattivazione di fenomeni franosi nell'area di avanfossa e le condizioni pluviometriche nel periodo precedente all'innescò dei movimenti. Appare evidente che la valutazione della pericolosità di frana non è quantificabile esclusivamente con analisi statistiche delle variabili in gioco, ma necessita di una completa definizione dell'ambiente geologico in cui il fattore innescante piovosità interviene. A questo riguardo, gli elementi che sono risultati indispensabili per l'acquisizione di una base conoscitiva dei movimenti di versante sono principalmente due: il riconoscimento delle strutture idrogeologiche naturali e dei loro limiti e la classificazione dei fenomeni franosi. Tali elementi sono risultati determinanti sulla scelta della variabile idrologica in grado di giustificare l'innescò di un determinato movimento di versante. I successivi calcoli della probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi si sono quindi basati sui risultati di tale scelta.

La caratterizzazione idrogeologica rappresenta una conoscenza di non sempre facile acquisizione, ma la puntuale presenza di fenomeni di instabilità in contesti idrogeologici complessi la rende indiscutibilmente necessaria nell'elaborazione di modelli interpretativi del ruolo delle piogge nella franosità. Un chiaro esempio proviene dai risultati dell'analisi dei casi di Pisticci e Pomarico: l'individuazione di cumulate significative per l'innescò dei movimenti in periodi di diversi giorni a ritroso (fino a 92) rispetto alla data di attivazione delle frane, non avrebbe avuto ragione di esistere e non sarebbe stata nemmeno giustificabile senza una preliminare elaborazione di un modello completo di versante in grado di descrivere le modalità di infiltrazione e di circolazione sotterranea delle acque di origine meteorica per le aree in esame.

Alla complessità dei caratteri idrogeologici locali si associa spesso una estrema complessità dei fenomeni franosi. La conoscenza dei meccanismi e delle dinamiche dei movimenti di versante è da ritenersi indispensabile qualora si intenda effettuare una zonazione della pericolosità di frana su aree estese. I casi delle aree "campione" di Pisticci e Pomarico ne sono di nuovo un esempio: la stretta similitudine riscontrata, anche per quanto riguarda i valori di pericolosità calcolati per i due casi, dimostra che i risultati ottenuti in aree "campione", possono essere utilizzati in zone geologicamente simili, anche non antropizzate. A quest'ultima tematica fa riferimento l'approfondimento circa l'influenza del fattore antropico sulla franosità della collina di Montalbano Jonico, i cui risultati indicano chiaramente che l'applicazione delle serie storiche di frana costruite

per centri abitati anche ad aree non insediate o con presenza limitata dell'uomo deve tenere conto dell'annullamento di tale fattore. Così al contrario la progettazione di un insediamento antropico collinare deve considerare l'aumento di incidenza di questo.

Le simulazioni effettuate con il codice di calcolo FLAC per i versanti "campione" sono risultate idonee nella ricostruzione della dinamica dei fenomeni franosi che hanno prodotto in superficie gli effetti riconosciuti sia sulla base dei rilevamenti di campagna e dei dati di letteratura sia dall'analisi delle foto aeree. Le simulazioni in presenza di flusso hanno consentito, inoltre, di valutare l'azione destabilizzante prodotta dalla filtrazione. Tali modelli si rivelano, quindi, utili nella previsione dell'evoluzione dei versanti in frana. Essi, inoltre, confermano le grandi potenzialità degli studi a carattere geomorfologico vista la grande corrispondenza nei risultati dei due tipi di indagine.

Nel quadro delle conoscenze che contribuiscono alla realizzazione di un modello completo di versante, i dati provenienti da stazioni di monitoraggio sono risultati di primaria importanza in quanto confortano le deduzioni qualitative in merito ai tempi di risposta delle pressioni interstiziali alle piogge. La progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio presenta tuttavia numerose difficoltà tra cui: scelta dei siti da monitorare in relazione alle finalità previste, scelta e modalità di posa in opera dei sensori, elevati costi; ma l'acquisizione di dati sperimentali rappresenta un vincolo per la valutazione delle differenti risposte degli acquiferi a diversi scenari idrometeorologici. I primi dati della stazione di monitoraggio Poma1 e quelli provenienti da altri siti dell'avanfossa hanno contribuito sia alla comprensione delle modalità di circolazione ipogea sia alla verifica dei risultati dell'analisi idrologico-statistica. Tali dati rappresentano, quindi, un elemento indispensabile per l'elaborazione di un modello previsionale.

Per quanto riguarda la modellazione idrologico-statistica, l'intero studio dimostra la necessità di basare tali analisi su di una approfondita conoscenza del territorio. Il modello soglia "modificato" proposto in questa Tesi rappresenta un valido esempio di come la determinazione del tempo di ritorno e della coniugata probabilità di occorrenza delle variabili idrologiche connesse all'innescò di instabilità di pendio, diventa un utile strumento di valutazione della pericolosità (o probabilità di occorrenza) di frana, se opportunamente combinato con le frequenze di riattivazione di uno stesso fenomeno franoso o di innescò di frane aventi tipologie simili. Quest'ultimo tipo di informazione è ricavabile esclusivamente in base all'analisi storiche sui movimenti di massa e ottenibile, quindi, solo nei casi in cui i fenomeni abbiano colpito centri abitati o

infrastrutture antropiche. A questo proposito ritengo opportuno esporre alcune considerazioni finali.

La grande utilità delle serie storiche di frana risulta evidente in studi a carattere previsionale; in alcuni casi si può giungere ad una valutazione della pericolosità di frana facendo solo riferimento ai dati storico - scientifici sulle attivazioni di fenomeni franosi. Ma accade spesso che tali dati descrivono in maniera esauriente solo alcuni periodi, che spesso corrispondono agli ultimi 50 anni. Ritengo valido, quindi, trattare in maniera rigorosamente statistica periodi limitati ma certamente più completi di informazioni. Applicando tale principio si può estendere la metodologia espressa dal modello soglia "modificato" al caso di studi previsionali in aree franose non antropizzate: in questo caso la frequenza dei fenomeni franosi è ricavabile dall'analisi delle foto aeree relative a diversi periodi; l'innescò della frana e il superamento della soglia devono però essere considerati eventi indipendenti. I valori soglia andranno sempre ricavati dagli studi sui centri abitati ed applicati secondo i principi e i risultati contenuti in questa Tesi.

In sintesi i risultati e le considerazioni conclusive della presente Tesi mostrano chiaramente quanto segue.

- La validità di un modello previsionale, basato sulle relazioni piogge-frane, è grandemente condizionata dalla scelta della variabile idrologica in grado di "giustificare" l'innescò delle instabilità di pendio considerate. Tale scelta deve seguire un criterio di valutazione basato sul grado di eccezionalità dell'evento pluviometrico coniugato al fenomeno franoso, ma deve tenere conto anche della possibile influenza di eventi piovosi "ordinari".
- La valutazione della probabilità di occorrenza di frana in relazione ad eventi pluviometrici a carattere eccezionale, può essere effettuata in base alle relazioni individuabili dall'applicazione di un modello idrologico-statistico.

Le applicazioni su base statistica risultano valide solo a partire da una esauriente conoscenza di base delle strutture idrogeologiche naturali e dei loro limiti e dalla classificazione dei fenomeni franosi investigati. La definizione di tali caratteri consente di individuare la variabile idrologica di cui sopra e risulta indispensabile, inoltre, nel caso si vogliano estendere i risultati delle analisi di versanti "campione" ad aree estese anche non antropizzate.

- Attraverso le analisi di stabilità dei pendii si possono determinare le distribuzioni delle pressioni interstiziali che provocano fenomeni di instabilità in un determinato versante; individuate, attraverso un sistema di monitoraggio, le relazioni tra tali

distribuzioni e le condizioni idrologiche ad esse connesse, le analisi idrologico-statistiche possono definire la periodicità delle condizioni di instabilità.

- I risultati della combinazione dei due modelli, idrologico-statistico e completo di versante, possono contribuire alla valutazione del diverso “peso” che il fattore innescante “piovosità” assume in relazione ai fattori geologici, morfologici, idrogeologici, geomeccanici, che determinano condizioni al limite di equilibrio nei versanti. Cosicché è possibile definire, per una data area, una zonazione della pericolosità di frana in relazione ad eventi di precipitazione.

## Bibliografia

- AA. VV. (1998). Rivista scientifica: Environmental Geology, Vol. 35, No. 2-3, n. 14 articoli, 240 pp.
- Almagià R. (1910): Studi geografici sulle frane in Italia: l'Appennino centrale e meridionale. Memorie della Società Geografica Italiana, Vol. XIV, edito in: "Atti Congresso Geografico Italiano", vol. II.
- Ambrosetti P., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Vazzani L. & A. Zanferrari (1983). Neotectonic map of Italy. CNR, Sheet 4.
- Arnell N.W. & S. Gabriele (1988). The Performance of the Two-Component Extreme Value Distribution in Regional Flood Frequency Analysis. Water Resources Research, Vol. 24, n. 6, pp. 879-887.
- Baldassare G. & B Radina (1971). Sorgenti di una parte del medio bacino del fiume Bradano. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. 6, pp. 137-160.
- Baldelli P., Aleotti P., Polloni G., Tosti L.A., Andrei G. & G. Milani (1998). Fenomeni franosi lenti in terreni argillosi: un contributo alla classificazione ed al monitoraggio. Convegno: Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1-2 ottobre 1998.
- Balduzzi A., Casnedi R., Crescenti U. & M. Tonna (1982). Il Plio-Pleistocene del Bacino pugliese (Avanfossa Appenninica). Geologica Romana, Vol. XXI, pp. 1-28.
- Benedini M. & G. Gisotti (1985). Il dissesto idrogeologico. Ed. Nuova Italia Scientifica.
- Bertini T., Cugusi F., D'Elia B. & M. Rossi Doria (1984). Climatic condition and slope movements of colluvial cover in Central Italy. 4<sup>th</sup> Intern. Symp. on Landslides, Toronto, Vol. 1, pp.367-376.
- Bertini T., Cugusi F., D'Elia B. & M. Rossi Doria (1986). Lenti movimenti di versante nell'Abruzzo adriatico: caratteri e criteri di stabilizzazione. Atti XVI Conv. Naz. di Geotecnica, Bologna 14-16 Maggio 1986, Vol. 1, pp. 91-99, AGI, CLEUP.
- Boenzi F., Di Gennaro M.A. & L. Pennetta (1978). I terrazzi della valle del Basento (Basilicata). Rivista Geografica Italiana, Vol. 85/4, pp. 395-418.
- Boenzi F., Palmentola G. & A. Valduga (1976): Caratteri geomorfologici dell'area del Foglio "Matera". Bollettino della società Geologica Italiana, Vol. 95, pp. 527-566.
- Bonardi G, D'Argenio B. & V. Perrone (1988): Carta geologica dell'Appennino meridionale. 74° Congresso della Società Geologica Italiana, Sorrento 13-17 settembre 1998.
- Bozzano F. & G. Scarascia Mugnozza (1994). I fenomeni di erosione nell'area dei terrazzi marini dell'arco ionico-lucano. Geologica Romana, Vol. XXX, pp. 769-778.
- Bozzano F. (1992). Analisi dei processi di dinamica dei versanti in relazione all'evoluzione geologico-strutturale Plio-Quaternaria della Fossa Bradanica. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Tesi di Dottorato in Scienze della Terra.
- Bozzano F., De Pari P. & G Scarascia Mugnozza (1996). Historical data in evaluating landslide hazard in some villages in Southern Italy. Proc. of the 7th Int. Symp. On Landslides (ISL '96), Vol. 1, pp. 159-164, Trondheim (Norway).
- Brebbia C.A. (editor) (1978). Recent advances in boundary element method. Pentech Press, London.
- Bruckner H. (1980). Marine terrassen in suditalien, Eine quartarmorphologische studie uber das Kustentiefland von Metapont. Dusseldorfer Geographische Schriften, Vol. 14, pp. 1-235.
- Caine N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annal., Vol. 62A, pp. 23-27.
- Calcagnile G. & R. Canziani (1982). Indagini gravimetriche nell'area franosa di Pisticci

- (Lucania). *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XVII, pp. 127-149.
- Calò G., Spizzico M. & R. Tinelli (1992). Lineamenti geologici, idrogeologici e climatologici del bacino del torrente "La Canala". *Geologia Tecnica & Ambientale*, Numero 1, Gennaio-Marzo 1992.
- Calò G.C., Ciet P., Dragone M., Sciannamblo D., Spizzico M. & G.S. Tazioli (1985). Ricerche sperimentali sull'erosione e trasporto solido in un bacino attrezzato della Lucania Ionica. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XX, parte II, pp. 281-302.
- Cancelli A. & R. Nova (1985). Landslides in soil and debris cover triggered by rainfall in Valtellina (Central Alps - Italy). In *Proc. IV Int. Conf. & Field Workshop on Landslides*, Tokio, pp. 267-272.
- Cannon S.H. & S.D. Ellen (1988). Rainfall that resulted in abundant debris flow activity during the storm. *USGS Spec. Pap.*, 1434, pp. 27-35.
- Cantelli C. (1960). Sul Quaternario di Gravina di Puglia. *Giornale di Geologia*, s.2 XXVII, pp. 211-216.
- Canuti P. & N. Casagli (1996). Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana. CNR-GNDCI, pubb. n. 846. Estratto da "Fenomeni Franosi e Centri Abitati", Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994.
- Canuti P., P. Focardi & C.A. Garzonio (1985). Correlation between rainfall and landslides. *Proc. 27<sup>th</sup> I.G.C.*, Moscow. *Bull. IAEG*, Vol. 32, pp 49-54.
- Capaldi C., Civetta L., Lirer L. & R. Munno (1979). Caratteri petrografici ed età K/Ar delle cineriti intercalate nelle formazioni pleistoceniche della Fossa Bradanica. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XIV, III parte, pp. 493-501.
- Capecchi F. & P. Focardi (1988). Rainfall and landslides: research into a critical precipitation coefficient in an area of Italy. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Landslides*, Lausanne, pp. 1131-1136.
- Carobene L. (1980). Terrazzi marini, eustatismo e neotettonica. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Vol. 3, pp. 35-41.
- Cartier C. & B. Pouget (1988). Pluviometrie et comportement des versants instables. *Proc. Int. Symp. on landslides*, Losanna, 10-15 July 1988, pp. 725-730.
- Cascini L. & P. Versace (1986). Eventi pluviometrici e movimenti franosi. AGI, Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, 14-16 maggio, Vol. 3, pp.171-184.
- Cascini L. & P. Versace (1988). Relationship between rainfall and landslide in a gneiss cover. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Lausanne, Vol. 1, pp. 565-570.
- Casnedi R.(1988). La Fossa Bradanica: origine, sedimentazione e migrazione. *Mem. Soc. Geol. It.*, Vol. 41, pp. 439-448.
- Casnedi R., Crescenti U. & Tonna M. (1982). Evoluzione dell'Avanfossa adriatica meridionale nel Plio-Pleistocene, sulla base di dati di sottosuolo. *Memorie della Società Geologica Italiana*, Vol. 24, pp. 243-260.
- Catenacci V. (1990). Il dissesto idrogeologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990. Basilicata. *Mem. Descr. della Carta Geol. d'Italia*, Vol. XLVII, pp. 211-227.
- Cecere V. & A. Lembo Fazio (1986). Condizioni di sollecitazione indotta dalla presenza di una placca lapidea su un substrato deformabile. AGI, Atti XVI Conv. Naz. di Geotecnica, pp. 191-202, Bologna.
- Cherubini C. & M. Lupo (1998). Physico-mechanical properties of Matera blue clays and correlation among them. 8th International IAEG Congress. Balkema, Rotterdam, pp. 283-288.
- Cherubini C. & N. Walsh (1982). Caratteristiche geolitologiche e geotecniche delle Sabbie di Monte Marano (dintorni di Gavina). *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XVII, pp. 319-338.
- Cherubini C. : Relazione sulla stabilità del versante orientale di Pomarico. Comune di

- Pomarico.
- Cherubini C., Guadagno F.M. & G. Valentini (1984). Caratteristiche geotecniche e condizioni di stabilità delle colline argillose terrazzate di Montalbano Jonico (Basilicata). *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XIX, pp. 121-145.
- Ciaranfi N., D'alessandro A., Loiacono F. & M. Marino (1996). A new stratigraphical section for the marine Quaternary in Italy. *Palaeopelagos*, Vol. 6, pp. 361-370.
- Ciaranfi N., Ghisetti F., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Pieri P., Rapisaldi L., Ricchetti G., Torre M., Tortorici L. & L. Vezzani (1983). Carta Neotettonica dell'Italia meridionale. CNR, Pubbl. 515 del "Progetto Finalizzato Geodinamica", pp. 1-62.
- Ciaranfi N., Maggiore M., Pieri P., Rapisaldi L., Ricchetti G. & N. Walsh (1979). Considerazioni sulla neotettonica della Fossa Bradanica. P. F. Geodinamica-Sottoprogetto Neotettonica, Vol. 251, pp. 73-95.
- Cinque A., De Pippo T. & P. Romano (1995). Coastal slope terracing and relative sea-level changes: deduction based on computer simulation. *Earth surface processes and landform*, Vol. 20, pp. 87-103.
- Cortini M. (1975). Età K-Ar del M. Vulture (Lucania). *Rivista Italiana di Geofisica*, Vol. 2 pp. 45-46.
- Cotecchia V. & M. Del Prete (1986). Consideration on stability of old landslide on historic centre of Grassano after the earthquake of 23 november 1980. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, Vol. XXI, pp. 155-167.
- Cotecchia V. & Magri G. (1967). Gli spostamenti delle linee di costa quaternarie del Mare Ionio fra Capo Spulico e Taranto. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. II, pp. 1-25.
- Crescenti U. (1975). Sul substrato pre-pliocenico dell'Avanfossa appenninica dalle Marche allo Jonio. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Vol. 94, pp. 583-634.
- Cruden D.M. & D.J. Varnes (1996) - Landslide type and processes. In: A. Keith Turner & R.L. Schuster (eds.), *Landslide investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, pp. 36-75.
- De Castro Coppa M.G., De Nucci M., Guadagno F.M., Moncharmont Zei M., Muoio L., Placella B., Sgarrella F., Raddei Ruggero E. & E. Turco (1979). Biostratigrafia e paleoecologia delle Argille grigio-azzurre bradaniche tra il fiume Basento e Cavone. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XIV, III parte, pp. 503-534, Bari.
- De Marco A. (1990). Rapporti tra geodinamica e sedimentazione nella Fossa Bradanica durante il Pleistocene: testimonianze mineralogiche. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Vol. 109, pp. 313-324.
- Del Prete M. (1981). La frana del centro storico di Grassano. Meccanismo, età, effetti del terremoto del 23/11/1980. *Rend. Soc. Geol. It.*, Vol. 4, pp. 169-172.
- Del Prete M., Bentivenga M., Amato M., Basso F. & Tacconi P. (1997). Badland erosion processes and their interactions with vegetation: a case from Pisticci, Basilicata, southern Italy. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, Vol. 20, pp. 147-155.
- Del Prete M., Bentivenga M., Coppola L. & H. Rendell (1994) Aspetti evolutivi dei reticoli calanchivi a sud di Pisticci. *Geologica Romana*, Vol. 30, pp. 295-306.
- Del Prete M., Giaccari E. & G. Trisorio-Liuzzi (1992a). Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata. Rapporto 1992, U.O. 2.37, CNR-GNDCI, Pubblicazione n. 841, 84 pp.
- Del Prete M., Giaccari E. & P. Lorenzo (1995). Evoluzione delle scarpate poswurmiane modellate nelle argille azzurre subappennine dell'Avanfossa Bradanica. Quaderni di Geologia Applicata. IV Congresso Nazionale Giovani Ricercatori. Riccione 18-21 Ottobre 1994.
- Del Prete M., Gostelow T.P. & Pininska (1992b) - The importance of historical observations in the study of climatically controlled mass movement on natural

- slopes, with examples from Italy, Poland and UK. Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides (ISL '92), Vol.3, pp. 1559-1568.
- Di Pierro M. (1981): Caratteri composizionali delle argille pleistoceniche nella zona di Miglionico (MT). Rend. Soc. It. Di Mineralogia e Petrologia, Vol. 37, pp. 229-240.
- Doglionni C.(1991). A proposal for the kinematic modelling of W-dipping subduction-possible application to the Tyrrhenian-Appennines system. Terra Nova, Vol. 3, pp. 423-434.
- Fell R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31(2), pp. 261-272.
- Fredlund D.G., N.R. Morgenstern & R.A. Widger (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.
- Freeze R.A., Massman J., Smith L., Sperling T. & B. James (1990): Hydrogeological decision analysis, 1. A frame-work, Groundwater, Vol.28, pp. 738-766.
- Fukuoka M. (1980): Landslides associated with rainfall. Geotechnical Engineering, Vol. 11.
- Gambassini P. (1967). Il conglomerato calabriano della Serra del Cedro presso Tricarico (Matera). Atti Accademia Gioenia Sc. Nat., Suppl. Sc. Geol., s.6 XVIII, pp. 157-161.
- Geo-slope (1995). User's guide for SEEP/W, version 3. Geo-slope International Ltd, Canada.
- Gostelow T. P., Del Prete M. & A. Simoni (1997). Slope instability in historic hilltop town of Basilicata, southern Italy. Quaternary Journal of Engineering Geology, Vol. 30, pp. 3-26.
- Govi M., Mortara G. & P.F. Sorzara (1985). Eventi idrologici e frane. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XX, parte II, pp. 359-375, Bari.
- Greenwood J.A., Landwehr J.M., Matalas N.C. & J.R. Wallis (1979). Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distribution expressible in inverse form. Wat. Resour. Res., Vol. 15 (5), pp. 1049-1054.
- Guerricchio A. & G. Melidoro (1979). Fenomeni franosi e neotettonici nelle argille grigio-azzurre calabriane di Pisticci (Lucania) con saggio di cartografia. Geol. Appl. e Idrogeol., Vol. XIV, parte I, pp. 105-135.
- Guerricchio A. & Valentini G. (1975). Un modello matematico per la valutazione dell'erosione tratto dall'esame di pendii calanchivi nelle argille azzurre lucane. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. X, I parte, pp. 241-275.
- Guzzetti F., Cardinali M. & P. Reichenbach (1994). The AVI Project: A Bibliographical and Archive Inventory of Landslides and Floods in Italy. Estratto da Environmental Management, Vol. 18, n° 4, pp. 623-633.
- Hanenberg W.C. (1991). Pore pressure diffusion and the hydrologic response of nearly saturated, thin landslide deposits to rainfall. Jour. Geology, Vol. 99, pp. 886-892.
- Hippolyte J. C., Angelier J., Roure F. & P. Casero (1994). Piggyback basin development and thrust belt evolution: structural and paleostress analyses of Plio-Quaternary basin in the Southern Appennines. Journal of Structural Geology, Vol. 16, pp. 159-173.
- Hodge R.A. & R.A. Freeze (1977). Groundwater flow systems and slope stability. Canadian geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 446-476.
- Hosking J.R.M., Wallis J.R. & E.F. Wood (1984). Estimation of the generalized extreme value distribution by the method of probability weighted moments. Inst. Of Hydrology, Report 89, Wallingford, England, Vol. 27, pp. 251-261.
- Hutchinson J.N. (1970). A coastal mudflow on the London Clay cliffs at Beltinge, North Kent. Géotechnique, Vol. 20, pp. 412-438.
- Iannone A. & P. Pieri (1980). Caratteri neotettonici dei Fogli 176 "Barletta" e 177 "Bari".

- In "Contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, parte I, CNR, Pubbl. 356 del "Progetto Finalizzato Geodinamica", pp. 85-100.
- ICLA Costruzioni Generali S.P.A. (1990). Appalto-concorso per i lavori di consolidamento diretti ad eliminare le situazioni di rischio connesse alle condizioni del suolo del comune di Pisticci. Progetto stralcio esecutivo, Elaborato: stratigrafie ed indagini in sito, giugno 1990.
- ITASCA 1996. FLAC version 3.3, User's Manual. Itasca Consulting Group.
- Iverson R.M & J.J. Major (1987). Rainfall, groundwater flow and seasonal movement at Minor Creek landslide, northwestern California: physical interpretation of empirical relations. *Geol. Soc. America Bull.*, Vol. 99, pp. 579-594.
- Jenkinson A.F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 87, pp. 158-171.
- Jibson R.W. (1989). Debris flow in Southern Puerto Rico. *Geol. Soc. Am. Spec. Pub.*, Vol. 236, pp. 1-13.
- Lazzari S. & F. Lentini (1980). Note illustrative del Foglio 507 Pisticci. Regione Basilicata, pp. 1-55.
- Lazzari S. (1989): Strutture profonde passive e drenanti a protezione di alcuni abitati della Basilicata. Associazione Geotecnica Italiana 17th Convegno Nazionale di Geotecnica, Taormina, Vol. 1, pp. 259-270.
- Lazzari S. (1986). Criteri e tecniche di intervento per la tutela e la protezione dei centri urbani della Basilicata interessati da movimenti franosi. A.G.I. Atti 16° Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, pp. 91-100.
- Lazzari S., Caloiero D., Gabriele S., Lambiase S., Mercuri T., Pesce S., Tramutoli M. & P. Versace (1990). Effetti prodotti in Basilicata dagli eventi meteorici verificatisi nel periodo dicembre 1984 - aprile 1985. *UU.O. 1.4, 2.27, CNR-GNDCI*, 90 pp.
- Lentini F. (1967). Le successioni stratigrafiche plio-pleistoceniche sui due lati della dorsale Nocera-Colobraro (Matera). *Atti Accademia Gioenia Sc. Nat., Suppl. Sc. Geol.*, s.6 XVIII, pp. 181-186.
- Lentini F. (1969). Sezioni stratigrafiche plioceniche nella Val d'Agri presso Gannano (Matera). *Atti Accademia Gioenia Sc. Nat., Suppl. Sc. Geol.*, s.6 XX, pp. 19-79.
- Liggett J.A. & P.L.F. Liu (1983). The boundary integral equation method for porous media flow. *Allen and Unwin, Winchester, Mass.*
- Lupo M. (1994). Studio Geologico-Tecnico : Sistemazione di fontane e abbeveratoi nell'agro comunale. Paratia a protezione della fontana Salsa. Comune di Pomarico.
- Massari F. & G.C. Parea (1990a). Wave dominated Gilbert type gravel deltas in the hinterland of Gulf of Taranto (Pleistocene, southern Italy). *Spec. Pubbl. Int. Ass. Sed.*, Vol. 10, pp. 311-331.
- Massari F. & G.C. Parea (1990b). Progradational gravel beach sequences in the hinterland of the Gulf of Taranto. Guida all'escursione del Convegno "Sedimentologia delle paleospagge e paleodelta pleistocenici del Golfo di Taranto", Ginosola 10-13 ottobre 1990, pp. 99-134.
- Migliorini C. (1937). Cenno sullo studio e sulla prospezione petrolifera di una zona dell'Italia meridionale. *Il Congr. Mondiale Petrolio, Parigi*, 1-11.
- Ministero dei Lavori Pubblici - Ufficio del Genio Civile di Matera. (1957). Relazione geologico - tecnica.
- Ministero dei Lavori Pubblici - Ufficio del Genio Civile di Matera. (1971). Relazione geologico - tecnica.
- Moroni M.A. (1967). Notizie preliminari sulla fauna calabriana di Montescaglioso (Matera). *Atti Accademia Gioenia Sc. Nat., Suppl. Sc. Geol.*, s.6, Vol. XVIII, pp. 141-146.

- Mostardini F., Pieri P. & C. Pirini (1966). Stratigrafia del F° 212 Montalbano Jonico. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, Vol. 87, pp. 57-120.
- Neboit R. (1975). Plateaux et collines de Lucanie orientale et des Pouilles. At lier reproduction des th ses, Universit  Lille III (715 pp.).
- Neuman S.P. (1973). Saturated-unsaturated seepage by finite elements. Journal of Hydraulic Division, Am. Soc. Civil Engrs., Vol 99, n. 12.
- Ng C.W.W. & Q. Shi (1998). Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils. Quaterly Journal of Engineering Geology, Vol. 31, pp.105-113.
- Patacca E, Sartori R. & P. Scandone (1990). Tyrrhenian Basin and Apenninic Arcs: kinematic relations since late Tortonian times. Memorie della Societ  Geologica Italiana, Vol. XLV, I parte, pp. 425-451.
- Pieri P., Sabato L. & M. Tropeano (1994). Evoluzione tettonico-sedimentaria della fossa Bradanica a sud dell'Ofanto nel pleistocene. In: Guida alle escursioni. Congresso Soc. Geol. It., Bari. Quaderni Bibl. Prov.Matera, Vol. 15, pp. 35-54.
- Pinder G.F. & W.G. Gray (1977). Finite element simulation in surface and subsurface hydrology. Academic Press, New York.
- Polemio M. (1993). Le precipitazioni meteoriche e i fenomeni di instabilit  dei versanti in ambiente mediterraneo. MEDIT, Anno 4, Numero 4, Dicembre 1993.
- Pozzuoli A., Palumbo P., Pongitore F., Yanez I., Huertas F. & J. Linares (1979). Mineralogia e geochimica dei sedimenti argillosi pleistocenici fra Pisticci e il mare. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XIV, III parte, pp. 535-569.
- Pozzuoli A., Palumbo P., Pongitore F., Yanez I., Huertas F. & J. Linares (1980). Mineralogia e geochimica delle argille azzurre pleistoceniche di Montalbano Ionico. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat. Della Soc. Naz. Di Lett. E Arti di Napoli, s.4, Vol. XLVII, pp. 263-292.
- Prestininzi A. (1995). Il ruolo degli eventi naturali sulla evoluzione urbana del centro abitato di Caulonia - Castelvetero (Reggio Calabria). Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XXX, I parte.
- Regione Basilicata – Ufficio del Genio Civile di Matera (1978). Indagini geologiche e geotecniche sulle condizioni di stabilit  dei terreni dell'abitato di Pisticci (Prov. Matera). Relazione a cura di: Melidoro G., Viggiani C. & Guerricchio A.
- Reid M.E. (1994). A Pore-Pressure Diffusion Model for Estimating Landslide-Inducing Rainfall. The Journal of Geology, Vol. 102, pp. 709-717.
- Remson I., Hornburger G.M. & F.J. Molz (1971). Numerical methods in subsurface hydrology. Wiley Interscience, New York
- Ricchetti G. & P. Scandone (1979). Inquadramento geologico della Fossa Bradanica. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol XIV, I parte, pp. 489-501.
- Ricchetti G. (1965). Alcune osservazioni sulla serie della Fossa Bradanica: le "Calcareniti di M. Castiglione". Boll. Soc. Nat. Di Napoli, Vol. 74, pp. 243-251.
- Ricchetti G. (1967). Lineamenti geologici e morfologici della media valle del fiume Bradano. Bollettino della Societ  Geologica Italiana, Vol. 86, pp. 607-622.
- Royden L., Patacca E. & P. Scandone (1987). Segmentation and configuration of subducted lithosphere in Italy: An important control on thrust-belt and foredeep-basin evolution. Geology, Vol. 15, pp. 714-717.
- Sangrey D.A., Harrop-Williams W. & J.A. Klaiber (1984). Predicting groundwater response to precipitation. J. Getech. Eng.ing, ASCE, Vol. 11(7), pp. 957-975.
- Senatore M.R., Diplomatico G., Mirabile L., Pescatore T. & M. Tramutoli (1982). Franamenti sulla scarpata continentale pugliese del Golfo di Taranto (Alto Ionio, Italia). Geologica Romana, Vol. 21, pp. 497-510.
- Sgarrella F., Raddei Ruggero E. & E. Turco (1979). Biostatigrafia e paleocologia delle

- Argille grigio-azzurre bradaniche tra il fiume Basento e Cavone. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XIV, III parte, pp. 503-534.
- Terzaghi K. (1936). The Shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle Between Planes of Shear. In Proc., First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Harvard University Press, Vol. 1, pp. 54-56.
- Trescott P.C., Pinder G.F. & S.P. Larson (1976). Finite-difference model for aquifer simulation in two-dimensions with results of numerical experiments. *Tech. Water Resour. Invest.*, Vol. 7, U.S. Geol. Survey.
- Valentini G. (1995). Effetti di eventi meteorici in ambiente di «Argille azzurre». *Atti dei convegni Lincei 129, XIII Giornata dell'Ambiente*, pp. 75-94, Roma.
- Varnes D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984). *Landslide Hazard Zonation - a review of principles and practice*. UNESCO Paris, 63pp..
- Vezzani L. (1967). I depositi plio-pleistocenici del versante ionico della Lucania, *Atti Acc. Gioenia Sc. Nat. Suppl. Sc. Geol.*, serie 6, Vol. XVIII, pp. 151-179.
- Westaway R. (1993). Quaternary uplift of southern Italy. *Journal of Geophysical Research*, 98, B12, Vol. 21, pp. 741-772.
- Wieczorek G.F. & J. Sarmiento (1988). Rainfall, piezometric levels, and debris flows near La Honda, California, in storms between 1975 and 1983. *USGS Spec. Pap.*, 1434, pp. 43-63.
- Witchell E. (1868). On the denudation of the Cotteswolds. *Proc. Cotteswolds Naturalists Field Club*, Vol 4, pp. 214-230.

## Indice delle figure

Figura 1. Relazioni intensità - durata per frane superficiali in materiali granulari in diverse parti del mondo. 1) California ( <u>Wieczorek &amp; Sarmiento, 1988</u> ); 2) relazione generale ( <u>Caine, 1980</u> ); 3) Valtellina ( <u>Cancelli &amp; Nova, 1985</u> ); 4) Puerto Rico ( <u>Jibson, 1989</u> ); 5) relazione generale ( <u>Jibson, 1989</u> ). (Da <u>Canuti &amp; Casagli, 1996</u> ; ridisegnato).....	10
Figura 2. Relazioni tra il contenuto volumetrico d'acqua e la pressione dell'acqua nei pori. (Da Ng & Shi, 1998; ridisegnato) .....	15
Figura 3. Relazioni tra la permeabilità e la pressione dell'acqua nei pori. (Da Ng & Shi, 1998; ridisegnato).....	15
Figura 4. Griglia agli elementi finiti usata nelle analisi di filtrazione. (Da Ng & Shi, 1998) .....	16
Figura 5. Ubicazione dell'area di ricerca.....	19
Figura 6. Obiettivi e sintesi della ricerca.....	20
Figura 7. Stralcio della "Carta geologica dell'Appennino meridionale", scala 1:250000 (da <u>Bonardi et al., 1988</u> ). .....	25
Figura 8. Schema geologico e sezione dell'Appennino Meridionale (da Sella et al., 1988). .....	28
Figura 9. Evoluzione paleogeografica della "Fossa Bradanica" tra il Pliocene inferiore e il Pleistocene (da <u>Balduzzi et al., 1982</u> ; ridisegnato).....	29
Figura 10. Schema neotettonico della Fossa Bradanica. 1. Faglie normali; 2. Faglie di tipo indefinito; 3. Faglie probabili; 4. Asse di sollevamento; 5. Spostamento orizzontale; 6. Spinte laterali; 7. Faglie normali con periodo di attività compreso tra il Pleistocene medio e l'Olocene; Faglie normali con periodo di attività compreso tra il Pliocene e il Pleistocene; 9. Bordo di caldera. (Da <u>Ambrosetti et al., 1983</u> - ridisegnato).....	30
Figura 11. Schema dei rapporti stratigrafici fra le formazioni del Pliocene e del Pleistocene nella Fossa Bradanica (Valduga, 1968). 1) Basamento; 2) Calcareniti di Gravina; 3) Argille Subappennine; 3a) Argille Subappennine non radicate; 4) Sabbione di Garaguso; 4a) Sabbioni in lembi non radicati; 5) Conglomerato di Serra del Cedro; 6) Sabbie di Monte Marano; 7) Calcareniti di M. Castiglione; 8) Sabbie dello Statuto e Conglomerato di Irsina; 9) Limite Pliocene-Calabriano; a) Lembi non radicati di formazioni preplioceniche. ....	33

Figura 12. Carta dei terrazzi marini e delle aree di affioramento dei depositi regressivi. .....	34
Figura 13. Rappresentazione schematica dei terrazzi marini tra Montalbano J. e il mare. .....	39
Figura 14. Diagramma rappresentativo delle quote topografiche medie dei singoli ordini di terrazzamento marino in una sezione trasversale all'asse dell'avanfossa. (Da <u>Valentini, 1995</u> ).....	40
Figura 15. Diagramma rappresentativo delle quote topografiche medie dei singoli ordini di terrazzamento marino nei cinque bacini idrografici e relative rette di interpolazione. Bacino idrografico: 1) F. Sinni; 2) F. Agri; 3) F. Cavone; 4) F. Basento; 5) F. Bradano. (da <u>Bozzano e Scarascia Mugnozza, 1994</u> ). ....	40
Figura 16. Precipitazioni annuali e temperature medie annue nel periodo 1922-1994.	47
Figura 17. Precipitazioni medie massime mensili, temperature medie mensili e surplus-deficit idrico per l'area bradanica tra il 1922 ed il 1994. ....	47
Figura 18. Distribuzione delle precipitazioni nell'area bradanica.....	48
Figura 19. Modello evolutivo dei pendii calanchivi in relazione al flusso sotterraneo. (Da <u>Del Prete et al., 1997</u> ).....	51
Figura 20. Origine e approfondimento dei solchi calanchivi. (Da <u>Del Prete et al., 1997</u> ). .....	51
Figura 21. Eventi censiti nel corso dell'analisi storica. ....	59
Figura 22. Relazioni tra l'evoluzione dei versanti per frana e lo spostamento delle sorgenti.....	61
Figura 23. Collina di Pisticci: carta geologica con elementi di idrologia. ....	67
Figura 24 Curve granulometriche relative ai campioni prelevati sui versanti della collina di Pisticci (vedi fig. 23 per l'ubicazione). ....	71
Figura 25. Curve granulometriche e diagramma triangolare relativi ai campioni prelevati sui versanti della collina di Pisticci (vedi fig. 23 per l'ubicazione).....	72
Figura 26. Movimenti di versante che hanno colpito la collina di Pisticci. In rosso sono segnati i fenomeni che saranno trattati nell'elaborazione idrologico - statistica (cap. 4). ....	75
Figura 27. Profilo interpretativo della frana di San Donato (traccia A-B in fig. 23) .....	77
Figura 28. L'area franosa di san Donato in una foto aerea del 1967. (Vedi anche testo) .....	80

Figura 29. Il primo degli eventi franosi che hanno colpito l'area di San Donato nel periodo 1972-73, in una foto aerea del luglio '72. ....	81
Figura 30. Collina di Pomarico: carta geologica con elementi di idrologia. ....	89
Figura 31. Profilo geologico A –B -C. (Traccia della sezione in fig. 38) .....	91
Figura 32. Profilo geologico D –E. (Traccia della sezione in fig. 38).....	91
Figura 33. Curve granulometriche.....	92
Figura 34. Curve granulometriche e diagramma granulometrico dell'U.S. BUREAU OF SOIL. ....	93
Figura 35. Profilo geologico F-G (traccia della sezione in fig. 38).....	94
Figura 36. Carta geomorfologica del centro storico di Pomarico. ....	96
Figura 37. Ubicazione dei fenomeni franosi di cui si ha notizia storica. ....	97
Figura 38. Carta geologica e geomorfologica schematica dell'area della Salsa. ....	99
Figura 39. Foto aerea del 30-6-1972. In ROSSO sono segnate le scarpate e le corone di frana; in BLU il reticolo idrografico; in GIALLO le zone di maggiore interesse. ....	103
Figura 40. Foto aerea del 20-10-1977. In ROSSO sono segnate le scarpate e le corone di frana; in BLU il reticolo idrografico; in GIALLO le zone di maggiore interesse. ....	104
Figura 41. DTM della collina di Montalbano Jonico.....	111
Figura 42. Profili topografici del versante SW di Montalbano Ionico prima e dopo l'evento franoso (Mo6 di fig. 45) del 29/3/69. ....	112
Figura 43. Ubicazione degli interventi per il consolidamento dell'abitato di Montalbano Jonico. ....	114
Figura 44. Movimenti franosi dedotti dall'analisi delle foto aeree. ....	115
Figura 45. Carta dei movimenti di versante della collina di Montalbano Jonico. ....	116
Figura 46. Livelli piezometrici e andamento delle precipitazioni misurati in una località del comune di Pennabilli (PS). (Da <u>Baldelli et al., 1998</u> ) .....	120
Figura 47. Modalità di posa in opera dei piezometri. ( <u>ICLA, 1990</u> ) .....	121
Figura 48. Stratigrafia del sondaggio P1 (ubicazione in fig. 23). ( <u>ICLA, 1990</u> ).....	122
Figura 49. Stratigrafia del sondaggio P2 (ubicazione in fig. 23). ( <u>ICLA, 1990</u> ).....	123
Figura 50. Verticale piezometrica P1: correlazione tra il carico piezometrico e le precipitazioni giornaliere. ....	124
Figura 51. Verticale piezometrica P2: correlazione tra il carico piezometrico e le precipitazioni giornaliere. ....	124
Figura 52. Dorsale di Pomarico: carta geologica con elementi di idrogeologia.....	126
Figura 53.....	129

Figura 54. Sondaggio Poma1. (Vedi anche testo) .....	130
Figura 55. Confronto tra i dati di pioggia e quelli di carico piezometrico misurati al piezometro 1, profondità 14 m dal piano campagna (quota 282 m s.l.m.) .....	132
Figura 56. Confronto tra i dati di pioggia e quelli di carico piezometrico misurati al piezometro 2, profondità 4.3 m dal piano campagna (quota 282 m s.l.m.) .....	132
Figura 57. Schema del procedimento di calcolo ciclico non iterativo eseguito nel metodo di soluzione esplicito <i>time marching</i> utilizzato da FLAC (ridisegnato dal manuale d'uso di FLAC).....	135
Figura 58. Sezione geologica utilizzata nella simulazione numerica (traccia A-B in fig. 23) e ubicazione dei punti "monitorati" .....	144
Figura 59. Andamento della "unbalanced force" che indica il raggiungimento dell'equilibrio plastico in assenza di flusso.....	144
Figura 60. Modello in assenza di flusso: andamento degli spostamenti verticali (A) e orizzontali (B) in tre punti sulla superficie del modello da monte a valle (rispettivamente 8,64; 84,47; 154,32; ubicazione in fig. 58) durante il raggiungimento dell'equilibrio plastico. ....	145
Figura 61. Punti di plasticizzazione.....	146
Figura 62. Modello in assenza di flusso: vettori spostamento.....	147
Figura 63. Livelli di falda ipotizzati nella modellazione.....	149
Figura 64. Caso1: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali. ....	150
Figura 65. Caso 2: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali. ....	151
Figura 66. Caso 3: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi totali. ....	152
Figura 67. Caso 1: andamento inflow - outflow.....	154
Figura 68. Caso 2: andamento inflow - outflow.....	154
Figura 69. Caso 3: andamento inflow - outflow.....	155
Figura 70. Caso 1: punti di plasticizzazione.....	156
Figura 71. Caso 2: punti di plasticizzazione.....	157
Figura 72. Caso 1: andamento degli spostamenti verticali in punti al contatto tra i depositi sommitali e le Argille.....	158
Figura 73. Caso 1: andamento degli spostamenti orizzontali in punti al contatto tra i depositi sommitali e le Argille.....	158
Figura 74. Caso 3: punti di plasticizzazione.....	159
Figura 75. Alcune sezioni di analisi di stabilità (Da <u>Guerricchio &amp; Melidoro, 1979</u> ).....	161

Figura 76. Modello schematico del profilo A-B-C (figg. 31 e 38), utilizzato nell'elaborazione con FLAC.....	164
Figura 77. Sondaggi disponibili lungo il profilo utilizzato nel modello numerico (ubicazione in fig. 38).....	165
Figura 78. Modello in assenza di flusso: andamento dell' <i>unbalanced force</i> . Si nota il raggiungimento dell'equilibrio iniziale.....	168
Figura 79. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi piezometrici.....	169
Figura 80. Modello con flusso nelle sabbie: andamento delle pressioni dei pori e dei carichi piezometrici. ....	170
Figura 81. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento delle funzioni OUTFLOW ed INFLOW che dimostra il raggiungimento dell'equilibrio di flusso..	171
Figura 82. Modello con flusso nelle sabbie: andamento delle funzioni OUTFLOW ed INFLOW che dimostra il raggiungimento dell'equilibrio di flusso. ....	171
Figura 83. Modello con flusso nelle coperture detritiche: andamento dell' <i>unbalanced force</i> che indica il non raggiunto equilibrio iniziale. ....	172
Figura 84. Modello con flusso nelle sabbie: andamento dell' <i>unbalanced force</i> che indica il non raggiunto equilibrio iniziale. ....	172
Figura 85. Modello con flusso nelle coperture detritiche: punti di plasticizzazione. (Il dettaglio del riquadro è in fig. 87).....	173
Figura 86. Modello con flusso nelle sabbie: punti di plasticizzazione. ....	173
Figura 87. Vettori spostamento nella zona di valle nel caso di filtrazione nel detrito, particolare della figura 85. ....	174
Figura 88. Andamento dei vettori spostamento. ....	176
Figura 89. Confronto tra le precipitazioni annuali, le precipitazioni cumulate nei 4 mesi piovosi ed il numero di eventi di frana censiti per ogni anno (periodo 1952 - 1987). ....	178
Figura 90. Confronto tra le precipitazioni quinquennali ed il numero di eventi di frana censiti in 5 anni (periodo 1952 - 1987).....	178
Figura 91. Confronto tra la distribuzione mensile degli eventi di frana e quella delle precipitazioni massime mensili, ricavate come valore medio dei massimi (periodo 1952 - 1987). ....	179
Figura 92. Eventi alluvionali e frane nel periodo 1952-1987. ....	181

Figura 93. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Pisticci.....	187
Figura 94. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Pomarico.....	188
Figura 95. Frequenza cumulata (simboli) e probabilità cumulata (linea continua) secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni relativi alla stazione di Montalbano J. ....	189
Figura 96. Confronto tra le curve di pioggia cumulata relative a diversi tempi di ritorno (calcolate tramite la GEV) e le curve di pioggia cumulata associate agli eventi franosi dei Rioni Croci e Dirupo. ....	192
Figura 97. confronto tra le curve di pioggia cumulata relative a diversi tempi di ritorno (calcolate tramite la GEV) e le curve di pioggia cumulata associate agli eventi franosi che hanno colpito le aree di San Donato e Via Paisiello. ....	193
Figura 98. Confronto tra le curve di precipitazione cumulata relative a diversi tempi di ritorno e le curve di precipitazione cumulata associate a 6 eventi franosi. ....	197
Figura 99. Confronto tra le curve di precipitazione cumulata relative a diversi tempi di ritorno e le curve di precipitazione cumulata associate agli eventi franosi di Montalbano Jonico.....	201
Figura 100. Rappresentazione grafica della modalità di scelta della soglia per il caso di San Donato (Pisticci). ....	204
Figura 101. Rappresentazione grafica della modalità di scelta della soglia per il caso della frana La Salsa (Pomarico).....	205
Figura 102. Confronto tra le misure piezometriche registrate dal sistema di monitoraggio di Pisticci (prf.2.6.1) nel periodo settembre 1992 - febbraio 1995 e i valori assunti dalla variabile idrologica pioggia cumulata in 15 giorni nello stesso periodo. ....	208
Figura 103. Confronto tra le misure piezometriche registrate dal sistema di monitoraggio di Pisticci (prf.2.6.1) nel periodo settembre 1992 - febbraio 1995 e i valori assunti dalla variabile idrologica pioggia cumulata in 15 giorni nello stesso periodo. ....	210
Figura 104. Ubicazione delle aree oggetto di confronto e rappresentazione schematica dei depositi marini terrazzati. ....	213
Figura 105. Modello digitale del terreno: collina di Tempa Rossa.....	213
Figura 106. Carta dei movimenti di versante della collina di Tempa Rossa.....	215

## Indice delle equazioni

Eq. 1	$H(N) = 1 - (1 - P)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$ .....	6
Eq. 2	$H(N) \cong NP = \frac{N}{T}$ .....	6
Eq. 3	$P = P[\text{precipitazioni}] + P[\text{erosione}] + P[\text{sismi}]$ .....	7
Eq. 4	$Y(t) = f[X(t)]$ .....	11
Eq. 5	$P[E   Y < Y_s] = 0$ .....	11
Eq. 6	$P[E   Y \geq Y_s] = 1$ .....	11
Eq. 7	$P[E] = P[Y \geq Y_s]$ .....	11
Eq. 8	$F_{Y_M}(y) = P[Y_M \leq y]$ .....	11
Eq. 9	$T = \frac{1}{P[Y > Y_s]} = \frac{1}{1 - P[Y_s]}$ .....	12
Eq. 10	$H(N) = 1 - P[Y_s]^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$ .....	12
Eq. 11	$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_x \frac{\delta h}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y \frac{\delta h}{\delta y}\right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k_z \frac{\delta h}{\delta z}\right) + Q = \left(\frac{\delta \Theta_w}{\delta t}\right)$ .....	13
Eq. 12	$B = \frac{E}{3 \times (1 - 2\nu)}$ .....	138
Eq. 13	$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)}$ .....	138
Eq. 14	$\sigma_r = \frac{c}{\text{tg } \psi} = \text{tension cut-off}$ .....	139
Eq. 15	$K = \frac{k}{g\rho_w} \cong k \cdot 1.02 \times 10^{-6}$ .....	139
Eq. 16	$E = E_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{h0}}{\sigma_{atm}}\right) = E_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{v0} K_0}{\sigma_{atm}}\right)^\alpha$ .....	140
Eq. 17	$F_{X(x)} = \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-u)}{\alpha}\right]^{1/k}\right\}; k \neq 0, \alpha > 0$ .....	182
Eq. 18	$\beta_r = (r+1)^{-1} \left\{u + \frac{\alpha[1 - (r+1)^{-k} \Gamma(1+k)]}{k}\right\}$ .....	183

Eq. 19  $\beta_0 = u + \frac{\alpha\{1 - \Gamma(1+k)\}}{k}$  ..... 183

Eq. 20  $2\beta_1 - \beta_0 = \frac{\alpha\Gamma(1+k)(1-2^{-k})}{k}$  ..... 183

Eq. 21  $\frac{3\beta_2 - \beta_0}{2\beta_1 - \beta_0} = \frac{1-3^{-k}}{1-2^{-k}}$  ..... 183

Eq. 22  $k = 7.8589c + 2.9554c^2$  ..... 183

Eq. 23  $c = \frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3}$  ..... 183

Eq. 24  $b_r = n^{-1} \sum_{j=1}^n \left[ \frac{(j-0.35)^r}{n} \right] X_j$  ..... 184

Eq. 25  $PC_{n,j} = \sum_{i=j-n+1}^j P_i$  con  $n = 2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180$ ; ..... 185

Eq. 26  $P[A \cap B] \equiv P[A]P[B|A]$  ..... 203

Eq. 27  $H(N) = 1 - (1 - P[A \cap B])^N$  ..... 203

Eq. 28  $H(1) = P[A \cap B] \equiv P[A]P[B|A]$  ..... 203

**Indice delle tabelle**

Tabella 1 . Scala di pericolosità delle frane in base al tempo di ritorno (da <u>Fell, 1994</u> ). .	6
Tabella 2. Velocità di sollevamento medie nei cinque bacini idrografici ( <u>Bozzano &amp; Scarascia Mugnozza, 1994</u> ) .....	43
Tabella 3: Indici di distruzione relativi ai differenti ordini di superfici sommitali all'interno dei cinque bacini idrografici ( <u>Bozzano et al., 1996</u> ):.....	53
Tabella 4. Misure di portata delle sorgenti. ....	84
Tabella 5. Livello statico (quota s.l.m.) nei pozzi.....	84
Tabella 6. Livelli statici dei pozzi e piezometri (P1, P2). A - livello acqua assente; C- pozzo chiuso. Periodo di osservazione nov. 1997 - apr. 1998.....	107
Tabella 7. Livelli statici dei pozzi e piezometri (P1, P2). A- livello acqua assente; C- pozzo chiuso. Periodo di osservazione mag. '98 - ott. '98. ....	108
Tabella 8. Portate (litri/sec), pH, temperature ambientali e dell'acqua. Periodo di osservazione nov. 1997-ott 1998.....	109
Tabella 9.....	160
Tabella 10. Risultati dell'analisi di stabilità. ( <u>Guerricchio &amp; Melidoro, 1979</u> ; modificata). .....	162
Tabella 11. Valori dei parametri della GEV per ciascuna variabile idrologica considerata. .....	186
Tabella 12. Principali caratteristiche delle frane utilizzate nella modellazione (ubicazione in fig. 26).....	191
Tabella 13. D (giorni): durata della cumulata <i>statisticamente significativa</i> calcolata a ritroso dalla data di accadimento del fenomeno franoso; Q (mm) = quantità di pioggia; T (anni) = tempo di ritorno. D' (giorni): durata della cumulata <i>significativa per l'innescò</i> dell'evento di frana; Q' (mm) = quantità di pioggia; T' (anni): tempo di ritorno.. ....	194
Tabella 14. D (giorni) = durata della cumulata <i>statisticamente significativa</i> calcolata a ritroso dalla data di accadimento del fenomeno franoso; Q (mm) = quantità di pioggia; T (anni) = tempo di ritorno. D' (giorni): durata della cumulata <i>significativa per l'innescò</i> dell'evento di frana; Q' (mm) = quantità di pioggia; T' (anni): tempo di ritorno. ....	198
Tabella 15. Data, dimensioni e danni degli eventi franosi trattati nella modellazione. L'ubicazione delle frane è in figura 45.....	200

Tabella 16. Tempi di ritorno (T, anni) e durata (D, giorni) delle piogge cumulate statisticamente significative. ....	202
Tabella 17. Confronto tra il numero di eventi di frana che hanno colpito la collina di Montalbano Jonico nel periodo 1947-1987 e quelli dell'area non urbanizzata di Tempa Rossa - San Leonardo (Pisticci). ....	214