CONVENZIONE TRA ARPA – SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO REGIONALE E SERVIZIO GEOLOGICO SISMICO E DEI SUOLI REGIONALE PER IL SUPPORTO ALLE ATTIVITA' DEL CENTRO FUNZIONALE.

DETERMINAZIONE DI SOGLIE PLUVIOMETRICHE PER INNESCO DI FENOMENI FRANOSI NELL'APPENNINO SETTENTRIONALE

I Rapporto

Bologna - Giugno 2005

Gruppo di lavoro

- **Arpa Servizio IdroMeteorologico:**

Sara Pignone

- **Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli:**

Lorenzo Del Maschio
Giampiero Gozza
Marco Pizziolo

COPIA

Premessa 4
1. Introduzione 5
2. Caratteristiche salienti delle Frane in Emilia-Romagna 7
3. I dati sulla attivazione dei movimenti franosi 11
3.1 I cataloghi delle frane storiche in Emilia-Romagna 11
3.2 Database storici delle frane 14
4. Dati storici delle precipitazioni 16
5. Le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica 17
5.1 Metodologia 17
6. Determinazione delle soglie pluviometriche per innesco frane 19
6.1 Introduzione 19
6.3 Analisi dei risultati 23
6.4 Determinazione di soglie pluviometriche per innesco movimenti franosi 26
6.5 Verifica delle curve – soglie 29
7. Conclusioni 31
8. Bibliografia 32

COPIA

PREMESSA

Il presente documento costituisce un "Allegato Tecnico" di sintesi della metodologia che ha prodotto la prima determinazione delle soglie pluviometriche di innesco dei fenomeni franosi nell'Appennino settentrionale. Tale soglia, espressa in una funzione, viene usata nelle procedure operative che il Centro Funzionale della Regione Emilia-Romagna ha predisposto in fase di previsione dei livelli di criticità idrogeologica e idraulica connessi agli eventi meteorologici, nonché di monitoraggio idraulico e idrogeologico a evento in atto.

COPIA

1. INTRODUZIONE

Per evento franoso si intende la mobilizzazione e/o rimobilizzazione di una massa di roccia o detrito lungo un versante. La mobilizzazione avviene quando il complesso delle Forze traenti supera le Forze resistenti, di conseguenza si ha rottura lungo un piano definito e conseguentemente si origina un movimento che ha termine al raggiungimento di un nuovo equilibrio.
Le precipitazioni costituiscono una delle cause scatenanti più frequenti per innesco delle frane. Le precipitazioni, sia in termini di quantitativi, che in termini di intensità rappresentano un indicatore indiretto dello stato di saturazione del suolo, della presenza di sovrapressioni interstiziali e lungo le superfici di discontinuità presenti nella massa rocciosa o detritica, che influenzano negativamente le Forze resistenti.
La osservazione dei fenomeni franosi del passato testimonia che esiste un legame diretto tra eventi pluviometrici e movimenti franosi. Fermo restando che ogni fenomeno franoso risponde singolarmente e in modo peculiare alle precipitazioni è noto che a periodi di eccezionale piovosità corrispondano periodi di eccezionale franosità e che le variazioni mensili nella frequenza delle frane ben si accordano con le variazioni mensili nella quantità di pioggia.
Recentemente si sono sviluppate ricerche inerenti alle relazioni intercorrenti tra eventi meteorici e frane, allo scopo di definire "valori soglia" delle precipitazioni.
Con il termine soglia si indica un valore minimo o massimo di una certa quantità necessaria per innescare un processo o un cambiamento (White et al. 1996); una soglia minima è il livello inferiore sotto il quale il processo non accade e una soglia massima rappresenta il livello sopra il quale il processo avviene sempre (Crozier 1996). Considerando le piogge come causa innescante dei movimenti franosi, una soglia può rappresentare la minima intensità o durata di pioggia.
I modelli proposti in letteratura si possono suddividere in due categorie principali: "modelli emipirici" e "modelli fisicamente basati". I primi sono basati su analisi statistica dei dati storici e forniscono relazioni empiriche esistenti tra piogge e fenomeni franosi; i secondi sono basati su modelli numerici che prendono in considerazione aspetti relativi al versante (idrologici, idrogeologici, morfologici e geotecnici) tentando di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono nel pendio e portano a instabilità (Montgomery and Dietrich 1994, Wilson and Wieczorek 1995, Crosta 1998, Crosta et al 2003). Seppur i modelli fisicamente basati risultano essere i più completi perché analizzano gli effetti prodotti dalle piogge sulle pressioni interstiziali, sui moti di filtrazione e sulle modalità di deflusso idrico, tuttavia la complessità delle condizioni naturali richiede una elevata quantità di dati che non sempre è disponibile soprattutto per studi a scala di bacino. Al contrario i modelli empirici sono più facilmente usati e fanno uso delle relazioni tra intensità, durata, altezza di pioggia giornaliera e/o pioggia cumulata in un periodo antecedente all'evento. Le più comuni soglie utilizzate sono quelle che definiscono una relazione tra intensità e durata e sono state individuate per frane superficiali e debris flow (Caine 1980, Cancelli e Nova 1985, Cannon & Ellen 1985, Wieczorek 1987, Larsen 1993, Ceriani et Al. 1994, Crosta & Frattini 2001,)
Successivamente l'approccio "intensità-durata" è stato ridefinito normalizzando i valori di pioggia intensa al valore di pioggia media annua in modo da considerare le condizioni climatiche della regione investigata (Cannon e Ellen 1985, Jibson 1989, Wieczorek et al. 2000, Aleotti 2004). Un altro frequente approccio è quello di considerare la pioggia dell'evento cumulata fino all'innesco della frane e intensità massima registrata durante l'evento (Govi et al 1985).
Altre metodologie mettono in relazione la pioggia cumulata su un periodo antecedente l'evento con la pioggia del giorno innesco frana (Lumb 1975, DeVita 2002) o con la pioggia cumulata durante l'intero evento meteorologico che ha originato la frana (Chleborad A. F 2000).
In alcuni casi la pioggia antecedente viene considerata come indicatore dello stato di saturazione del suolo (Crozier and Eyles 1980, Glade et al. 2000).
Pertanto la possibilità di definire delle soglie empiriche prevede che siano disponibili informazioni storiche, a carattere temporale, sia relativamente ai fenomeni di instabilità che ai valori di precipitazione. Inoltre le relazioni definite tra regime pluviometrico e la franosità valgono solo

COPIA

all'interno di una definita regione con caratteristiche geologiche e climatologiche omogenee e non possono essere esportate in altre regioni.
Parziali lavori sono stati realizzati in Appennino settentrionale relativamente a frane di medie/ grandi dimensioni per le quali i movimenti sono stati messi in relazione alle precipitazioni e alle variazioni dei livelli di falda (Bertolini e Pellegrini 2001, Lollino et Al 2001).
Questo documento ha lo scopo di definire attraverso la osservazione di eventi franosi accaduti in passato, un livello critico di precipitazioni valido in termini statistici da utilizzare in fase previsionale.
Le soglie sono quindi identificate tramite un'analisi statistica dei dati correlando la pioggia antecedente dell'evento con la pioggia cumulata dell'evento meteo da quando inizia fino all'innesco dei fenomeni franosi. Sono quindi identificate sia una soglia inferiore che rappresenta un livello critico minimo di precipitazione sotto la quale il fenomeno non si verifica e sia soglie intermedie che rappresentano diversi livelli di criticità, utili a caratterizzare l'evento meteo in termini di severità di effetti al suolo.
Il presente lavoro è stato svolto per un area dell'Appennino settentrionale identificata dai bacini dei fiumi Reno e i suoi affluenti (provincia di Bologna e Ravenna), Panaro (provincia di Modena), Secchia (provincia di Modena e Reggio Emilia), Enza e Crostolo (provincia di Reggio Emilia). È stata scelta questa area campione sia per la sua alta densità di frane e sia perché per queste province è presente un consistente database storico di frane per le quali sono riportate le date di attivazione.

COPIA

2. CARATTERISTICHE SALIENTI DELLE FRANE IN EMILIA-ROMAGNA

La conformazione geologica dell'Appennino settentrionale è dominata da rocce costituite in prevalenza da alternanze pelitico–arenaceo-marnose, da argille, e solo subordinatamente da rocce prevalentemente arenacee (figura 2.1).

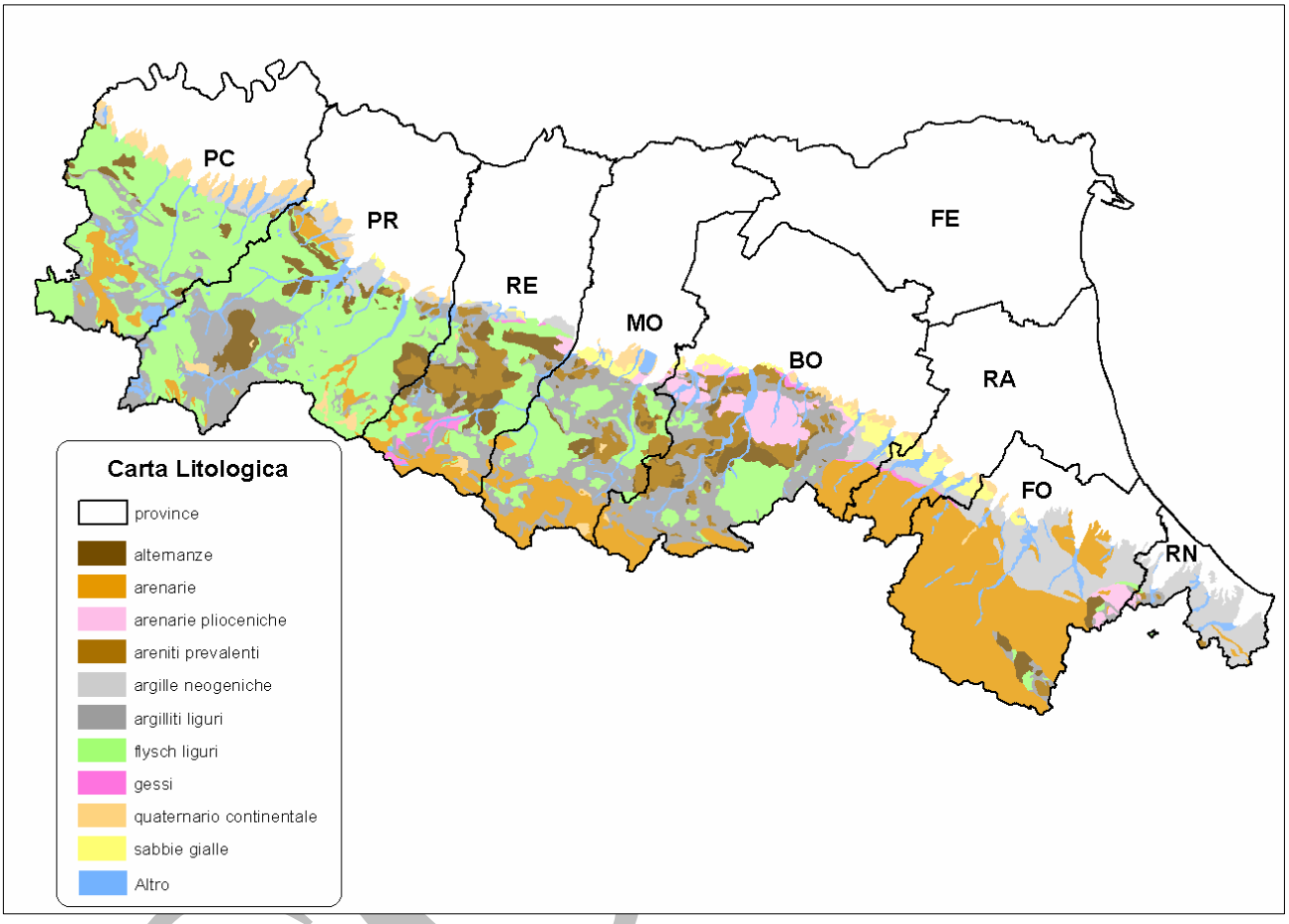


Figura 2.1: Carta litologica della Regione Emilia-Romagna.

Da tale conformazione deriva la abbondanza di frane, che coprono oltre il 20% del territorio collinare e montano. La presenza diffusa e spesso prevalente dei minerali argillosi nelle rocce, spesso a struttura caotica e/o intensamente scompaginate per azione tettonica, produce una forte degradazione superficiale. I minerali argillosi assorbono facilmente acqua modificando la loro struttura fisica, con conseguente diminuzione della resistenza alle tensioni che la forza di gravità esercita naturalmente sui versanti. Il settore centro occidentale dell'Appennino, da Piacenza a Bologna, è particolarmente abbondante di formazioni geologiche costituite prevalentemente da litotipi argillosi: questo spiega il motivo dell'alta franosità di questo rispetto al settore orientale, a est del Fiume Sillaro, caratterizzato soprattutto da litologie prevalentemente arenacee. Una rappresentazione sintetica della distribuzione delle frane può essere effettuata attraverso l'Indice di franosità, ovvero il rapporto tra la superficie occupata da frane e la superficie totale considerata.
Nelle figure sotto rappresentate, è rispettivamente indicato l'indice di franosità per classi litologiche (figura 2.2) e per bacino idrografico (figura 2.3).

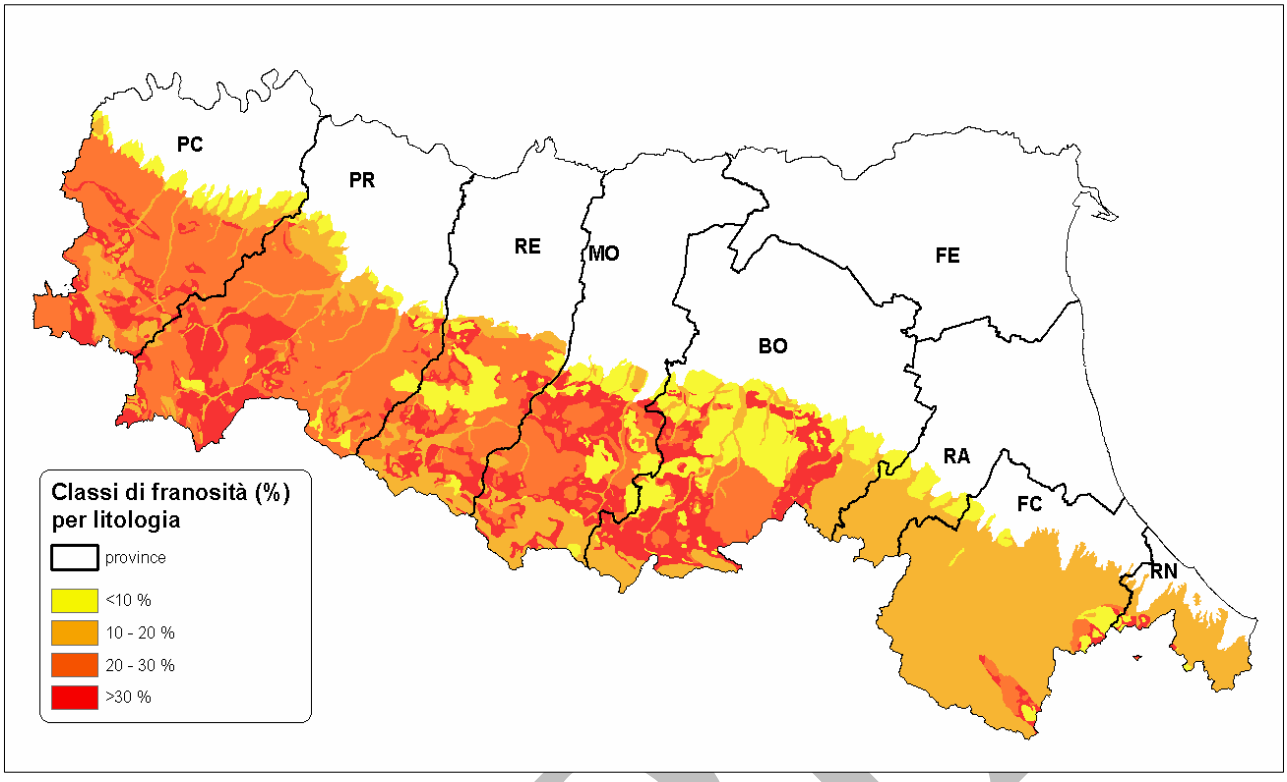


Figura 2.2: Carta dell'indice di franosità delle classi litologiche dell'Appennino emiliano-romagnolo.

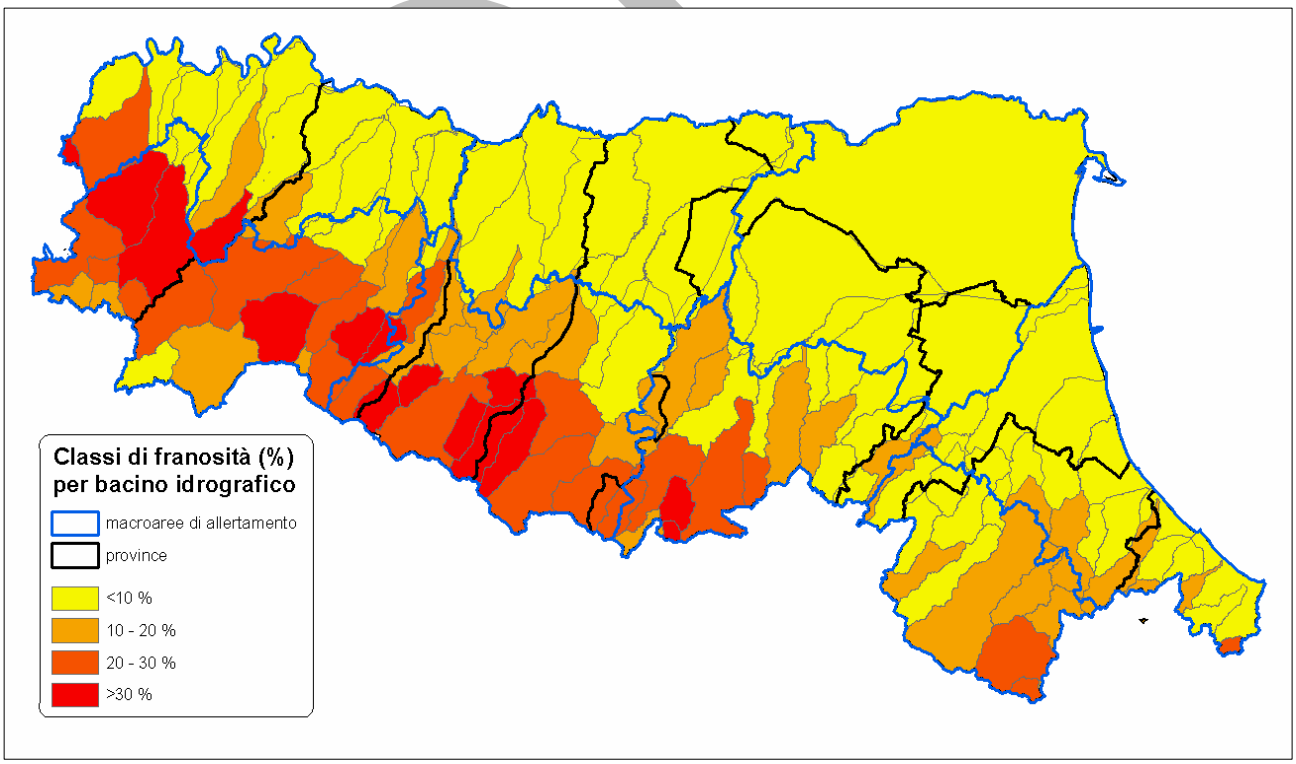


Figura 2.3: Carta dell'indice di franosità dei bacini idrografici dell'Appennino emiliano-romagnolo.

La Regione Emilia Romagna dispone di una completa mappatura geologica, a scala 1:10000, che ha permesso la identificazione di oltre 30.000 corpi di frana. In riferimento alla classificazione di Varnes (1978), le tipologie di movimenti gravitativi più diffuse sul territorio regionale sono scorrimenti traslativi e rotazionali e colate di fango e detrito, spesso combinate tra loro (slump-earth flow). Circa il 45% sono frane attive, mentre il restante è quiescente (figura 2.4). La maggior parte delle frane alterna periodi di quiescienza che possono durare decenni e anche secoli, a periodi di riattivazione generalmente della durata variabile da alcuni giorni fino ad alcuni anni.
In prevalenza esse risultano morfologicamente ben riconoscibili, e tali caratteristiche, accompagnate da una rarità estrema di fenomeni di neoformazione, permettono una adeguata cartografia di tali fenomeni. Di esse circa 1300 hanno un volume stimato in oltre 1 milione di metri cubi (figura 2.5). Gran parte dei corpi di frana appenninici si sono generati in occasione di fasi ed eventi climatici estremi, alcuni dei quali verificatisi migliaia di anni fa. Recenti studi testimoniano la notevole persistenza dei corpi di frana nel tempo e nello spazio superando, alcuni accumuli, anche la durata di migliaia di anni (datazioni al C^{14}).

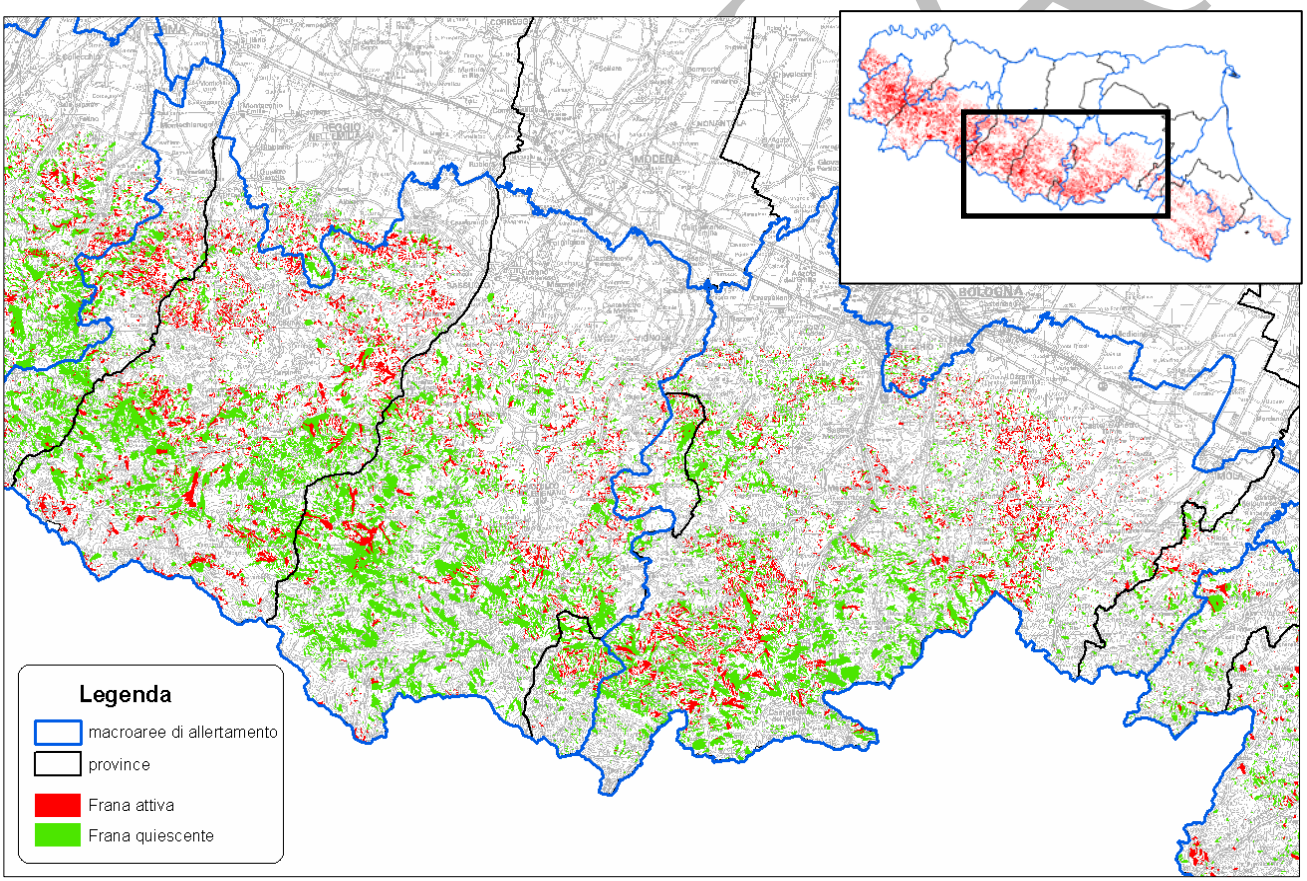


Figura 2.4: Distribuzione delle frane in Emilia-Romagna con particolare riferimento alla area pilota.

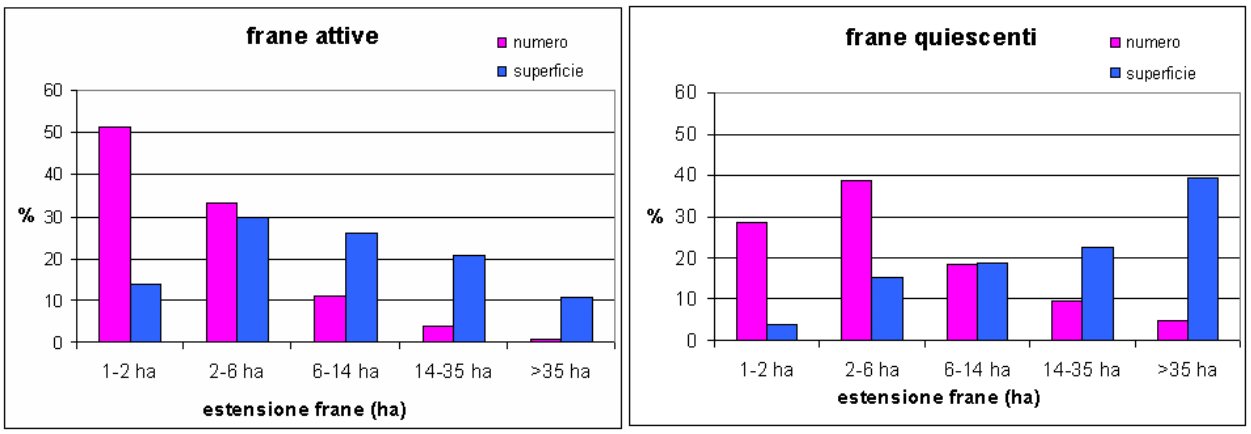


Figura 2.5: Numero delle frane (%) e relativa superficie occupata (%), per classi di dimensioni in Emilia-Romagna (www.regione.emilia-romagna.it/geologia).

Assai più difficoltosa risulta invece la cartografia dei fenomeni franosi superficiali, spesso ad andamento stagionale, di entità areale limitata (pochi metri o decine di metri quadrati), prevalentemente impostati in terreni seminativi, a prato o cespugliati, che spesso vengono riprofilate e sostanzialmente cancellate dalla quotidiana attività agricola. A differenza dei fenomeni franosi superficiali (soil slip) spesso descritti in aree perialpine, tali tipologie di frana appenninica solitamente non evolvono in colata di detrito, caratterizzate invece da elevate velocità (dell'ordine dei m/s), a causa della presenza di una significativa componente argillosa che ne controlla l'evoluzione. Rari casi sono stati segnalati solo in corrispondenza di eventi pluviometrici eccezionali (Papani et Al. 1972, Pellegrini 1973) e in litologie prevalentemente arenacee o marnose. Tali caratteristiche peculiari rendono, di conseguenza, le frane dell'Emilia-Romagna poco confrontabili, in genere, con quelle considerate nella maggior parte dei lavori prodotti sull'argomento.

COPIA

3. I DATI SULLA ATTIVAZIONE DEI MOVIMENTI FRANOSI

3.1 I cataloghi delle frane storiche in Emilia-Romagna

La Regione Emilia-Romagna ha impostato, nell'ambito della propria attività conoscitiva territoriale, un programma di ricerca sulle frane verificatesi negli ultimi secoli, finalizzato all'individuazione di parametri utili per la valutazione della pericolosità territoriale e del rischio. La ricerca e l'analisi della documentazione necessaria per la ricostruzione della serie storica delle frane è stata condotta secondo la metodologia sviluppata da tempo presso l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano di Torino per lo studio dei fenomeni relativi alla dinamica fluviale e al modellamento dei versanti (Caroni et al. 1990; Govi et al 1985; Govi e Turitto 1994, 1997; Tropeano 1989).
L'esigenza di estendere quanto più possibile la densità areale dei dati e l'intervallo temporale coperto ha comportato, insieme alla documentazione scientifica illustrativa di un campione limitato di fenomeni, l'utilizzo di informazioni integrative e "alternative", ossia non direttamente derivate da ricerche per finalità tecniche o scientifiche. Le principali tipologie di fonti considerate comprende:

1) - la bibliografia geologica e tecnica prodotta a partire dalla seconda metà del secolo scorso;
2) - la documentazione d'archivio prodotta o raccolta dai servizi tecnici e amministrativi di Enti Pubblici e Privati a partire dal secolo scorso;
3) - la stampa periodica a diffusione nazionale e locale disponibile con continuità dalla metà del secolo scorso;
4) - la letteratura storica, archeologica e naturalistica, sia pubblicata che inedita; per il territorio appenninico opere di buona qualità sono disponibili a partire dal Settecento.

Il complesso delle informazioni raccolte e analizzate criticamente ha portato alla stesura di un catalogo delle frane, verificatesi a partire dal secolo XII, per la maggior parte localizzate graficamente con buona precisione sulla Carta regionale "Inventario del dissesto" alla scala 1:25.000 (che rappresenta una sintesi dei dati contenuti nella Carta geologica 1:10.000). Con riferimento alle sue finalità, la compilazione del catalogo è stata basata sulle procedure seguenti:
- trasferimento dei dati direttamente dai documenti originali, senza manipolazioni, in modo da consentire analisi obiettive e conservare l'informazione originale;
- inserimento dei soli fenomeni per cui fosse possibile identificare con precisione data e areale interessato;
- nel caso di frane descritte da diverse fonti, verifica della congruità delle informazioni e in presenza di discordanze si è provveduto a identificare gli elementi dubbi; dove ciò non è stato possibile il dato non è stato preso in considerazione;

Attualmente si è proceduto alla schedatura di tutti i fenomeni per cui è stato possibile individuare con sufficiente precisione data di attivazione e areale interessato, per l'intero periodo compreso dalle fonti storiche sino al dicembre 2002 per la provincia di Modena, al dicembre 1999 per la provincia di Reggio Emilia e al dicembre 1996 per la provincia di Bologna (tabella 3.1). E'in corso la raccolta dei dati per il resto della Regione Emilia-Romagna.

Per ogni frana è indicata la suddivisione amministrativa (provincia, comune) in cui risulta compresa. Sono descritte in forma sintetica l'area interessata e le principali caratteristiche del fenomeno, comprensivi delle cause dell'innesco del fenomeno, spesso legate a eventi meteorologici intensi. Quando disponibili sono stati riportati anche i parametri dimensionali. Sono pure evidenziati gli effetti sul paesaggio e le opere antropiche, che possono fornire utili elementi per la definizione della tipologia e importanza dei movimenti, e le frane che hanno interferito con il reticolo idrografico.

COPIA

Tutti gli elementi conoscitivi acquisiti sono organizzati sotto forma di Schede informatizzate con il programma MS Excel 2000. La versione a stampa è stata impostata con un formato tabulare per facilitarne la rappresentazione sintetica. (Figura 3.1)
Le ubicazioni delle frane sono state poi georiferite e digitalizzate al fine di una gestione in ambiente GIS.

tabella 3.1: sintesi dei dati riportati nel database delle frane storiche per le province di Reggio Emilia, Modena e Bologna

	Fenomeni totali rilevati				Fenomeni totali rilevati localizzati			
	BO	MO	RE	TOTALI	BO	MO	RE	TOTALI
Frane (corpi di frana)	1378	2235	610	4223	1215	1871	610	3696
Numero complessivo di attivazioni di frane (franamenti)	1841	3553	1217	6611	1620	1424	1182	4226

COPIA

codice frana	Comune	Date attivazione		Località	Descrizione	Cause innesco	Classificazione nell'Inventario del Dissesto	Danni	Bac. idr. princ.	Bac. idr. sec.	Posiz. CTR 1:25000	Riferimenti documentazione
121c	Guiglia	1990	25 nov	Samone. Strada Provinciale n. 26 MO di Samone in prossimità del ponte sul F. Panaro, alla progressiva km 9 + 700.	La riattivazione di un piccolo movimento interessa la sede stradale.	Elevati apporti idrici connessi con le precipitazioni intense dei giorni 24 - 25 novembre 1990.	Non segnalata.	Deformazione e asportazione di un tratto della sede stradale.	F. Panaro		Tav. 236 - NE Pavullo nel Frignano	ARCH. SPDS MODENA - Archivio Regione Emilia-Romagna, Servizio Provinciale Difesa del Suolo, Risorse Idriche e Forestali di Modena. . Interventi urgenti per il ripristino dei danni causati alla viabilità provinciale dalle avversità atmosferiche dei giorni 25/26 - 11 - 1990 nei comuni di Pavullo, Lama Mocogno, Montese, Zocca, Guiglia, Marano. Relazione, 6 febbraio 1992. Cartografia localizzazione schematica dissesti.
144b	Palagano	2002	18 dic	Monchio. Strada intercomunale Monchio - Casa Golino - Mogno - Zona industriale di Montefiorino.	La rimobilizzazione di una frana interessa la strada costituente il collegamento con l'area delle industrie ceramiche di Montefiorino.	Elevati apporti idrici relativi alle precipitazioni intense e prolungate del novembre-dicembre 2002.	All'interno di una frana quiescente.	Asportazione parziale di un tratto di sede stradale, con interruzione del transito ai mezzi pesanti.	F. Secchia	T. Dolo	Tav. 235 - NE Montefiorino	ARCH. SPDS MODENA - Archivio corrente 3° piano. Evento alluvionale autunno 2002. Comune di Palagano. Segnalazione aggiornamento movimenti franosi, 18 dicembre 2002.

Figura 3.1: Struttura del database regionale storico delle frane

COPIA

3.2 Database storici delle frane

Il catalogo delle frane storiche dell'Emilia-Romagna costituisce la principale fonte dei dati di attivazione dei fenomeni franosi utilizzati nel presente lavoro. In totale le frane localizzate raccolte nei cataloghi storici per le province di Bologna, Modena e Reggio Emilia sono 3696. Tali dati sono stati integrati con la banca dati AVI (Censimento delle aree dell'Italia colpite da frane e da inondazioni per il periodo 1918-1994) realizzato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche per incarico della Protezione Civile Nazionale.
Le due Banche Dati sono state uniformate in modo da avere un'unica tabella omogenea con le stesse informazioni e in modo da dare ad ogni attivazione di frana un codice univoco identificativo.
Il catalogo AVI ha arricchito i dati soprattutto per le province per le quali la banca dati storica delle frane è in fase di realizzazione; il numero totale complessivo di franamenti localizzati e rilevati con precisione aumenta a 5028 (figura 3.2) ed a ognuno è stato attribuito un grado di attendibilità in base alla precisione della data di attivazione (tabella 3.2).
Per questo studio di determinazione delle soglie pluviometriche sono state utilizzate solo le attivazioni di frane con data che presenta un grado di attendibilità da 1 a 3 che risultano essere in numero di 3578. Inoltre siccome lo studio è stato fatto per l'area pilota rappresentata dalla province di Modena, Reggio Emilia, Bologna e parte della provincia di Ravenna che ricade nel bacino del fiume Reno, sono state considerate solo le frane che ricadono in questo territorio (figura 3.2) in numero di 3277.

Tabella 3.2: numero di franamenti suddivisi per grado di attendibilità riportati nel database regionale.

CONFIDENZA DELLA DATA DI ATTIVAZIONE	GRADO DI ATTENDIBILITA	NUMERO DI ATTIVAZIONI
giorno certo	1	2178
giorno di segnalazione(non necessariamente coincidente con il giorno di attivazione)	2	1183
breve periodo (1-7gg)	3	217
mese	4	659
due mesi consecutivi	5	84
stagione	6	162
due stagioni o 4 o più mesi consecutivi	7	49
anno	8	370
segnalazione pluriennale: 1973-1978	9	80
secolo	10	44

COPIA

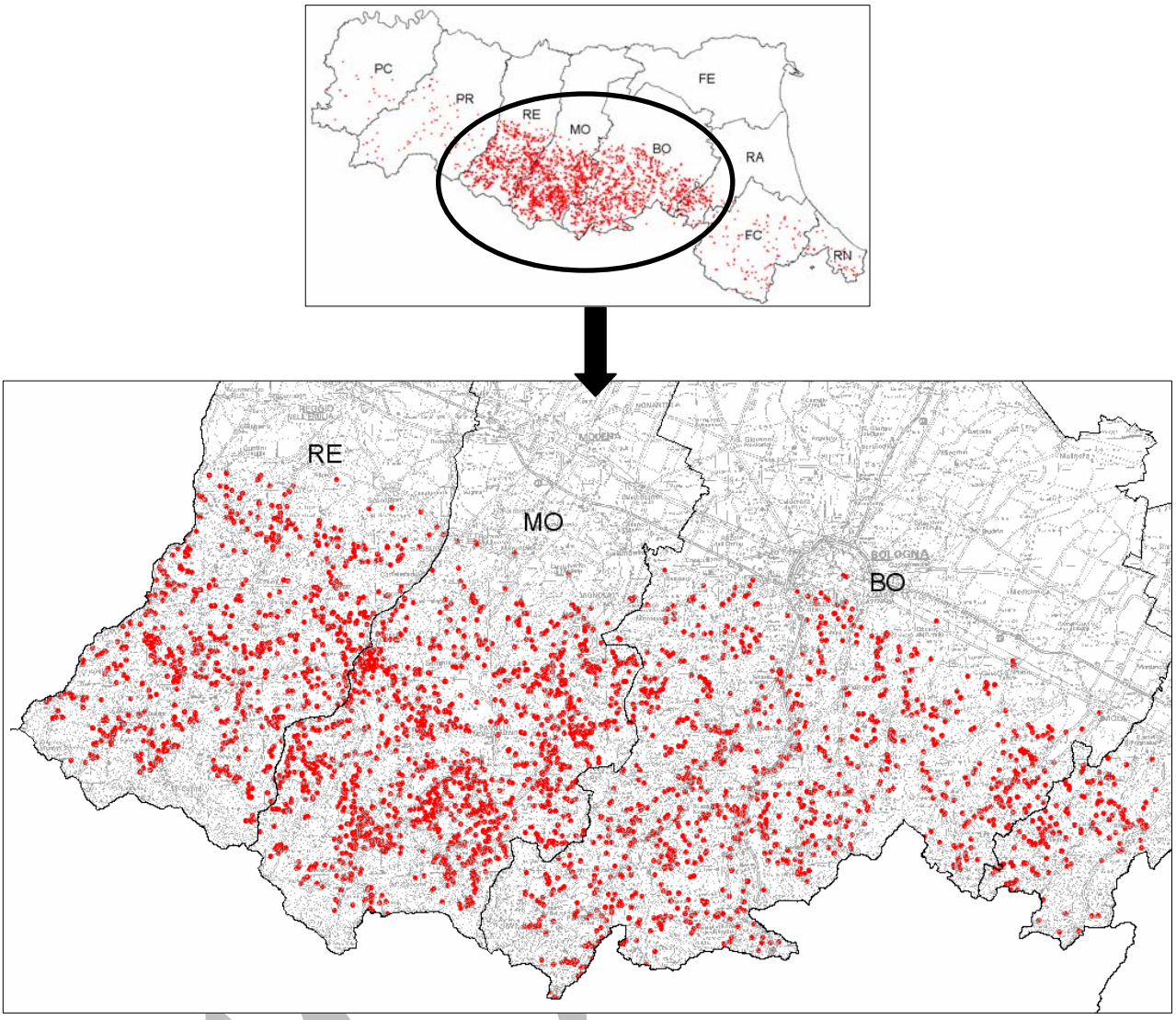


Figura 3.2: Densità delle frane derivata dall'unione dalla Banca dati Regionale e la Banca Dati AVI. In evidenza l'area pilota.

4. DATI STORICI DELLE PRECIPITAZIONI

La rete di monitoraggio pluviometrico della regione Emilia Romagna, gestita dal Servizio IdroMetereologico Regionale di ARPA (Arpa-SIM), consta di oltre 200 pluviometri di misura in tempo reale.
Come si può notare la distribuzione dei pluviometri garantisce una buona copertura del territorio regionale. I pluviometri in telemisura sono stati installati a partire dall'anno 2001 integrando e in parte sostituendo i pluviometri a lettura meccanica (figura 4.1).

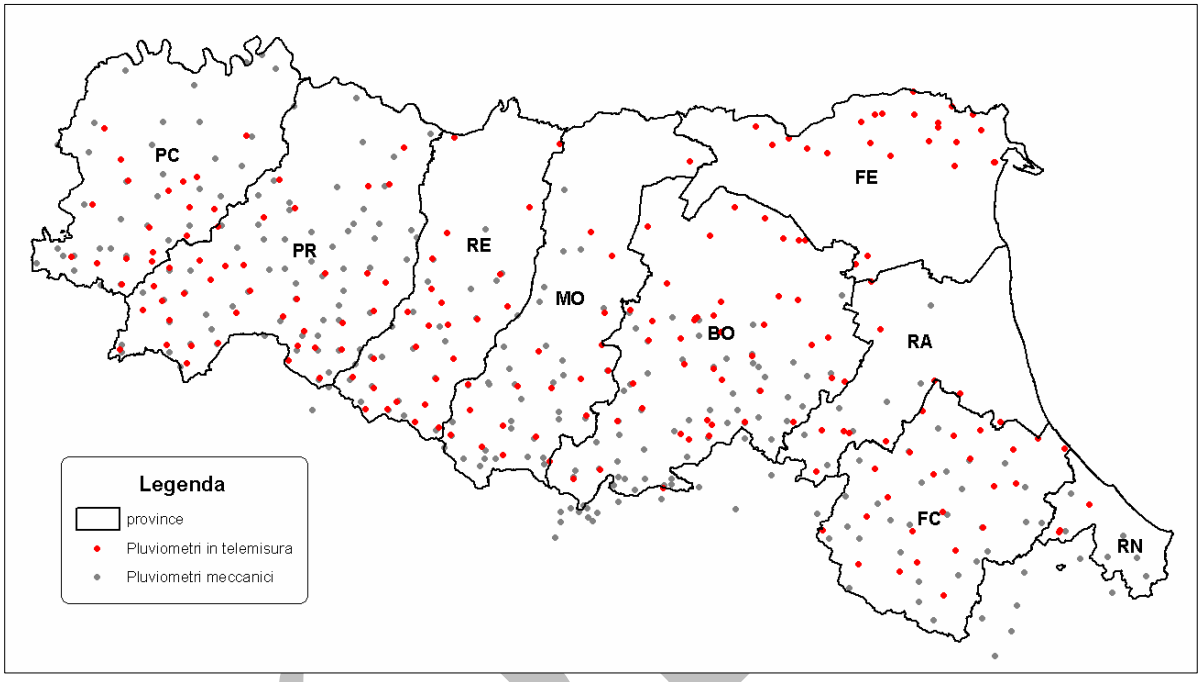


Figura 4.1: Ubicazione delle stazioni pluviometriche.

Nel lavoro statistico effettuato per la determinazione delle soglie pluviometriche sono stati presi in considerazione i pluviometri meccanici che presentano una serie storica di dati di pioggia di almeno 10 anni (periodo di tempo significativo per l'attendibilità del dato). I pluviometri in telemisura sono solitamente localizzati in prossimità dei pluviometri meccanici; dall'analisi effettuata risulta che circa il 50% dei pluviometri meccanici è ubicato ad una distanza inferiore ai 3 km rispetto a quelli in telemisura mentre la percentuale sale intorno al 70% per una distanza prossima ai 5 Km. Ovviamente bisogna anche considerare il fatto che un buon numero dei pluviometri meccanici ad oggi o non esistono più o sono attivi senza alcuno strumento in automatico associato.
I pluviometri meccanici utilizzati per l'analisi degli eventi di frana storici nell'area campione sono 134 ma a causa di lacune nella serie di dati, per ogni evento sono disponibili mediamente 90 stazioni con misure di pioggia.
I dati storici di precipitazione sono:

- dati giornalieri (mm/24h): sono stati utilizzati per la ricostruzione della "pioggia di evento" e della "pioggia antecedente". La serie storica dei dati parte dal 1950 e, solo per la provincia di Bologna, è disponibile una serie consistente di dati a partire dal 1916;
- dati di pioggia intensa giornaliera da 1 a 5 giorni: sono stati utilizzati per la costruzione dei tempi di ritorno delle piogge. Questo dato è stato ricavato dai dati giornalieri estraendo i valori di pioggia intensa giornaliera per ogni anno. Per aumentare la serie storica i dati dal 1920 al 1950 sono stati ricavati e direttamente informatizzati per l'occasione;
- dati di pioggia mensile: dal 1950 al 2002;
- dati di pioggia annua: dal 1950 al 2002.

5. LE LINEE SEGNALATRICI DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA

I dati di pioggia, estratti dagli Annali Idrografici, sono stati utilizzati per costruire le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica relativamente a ciascun pluviometro presente sul territorio regionale allo scopo di correlare i tempi di ritorno degli eventi pluviometrici con l'innesco di movimenti franosi.
Sono di seguito descritti i risultati dell'analisi regionale di frequenza delle precipitazioni intense giornaliere e plurigiornaliere relative al territorio della Regione Emilia-Romagna. Le elaborazioni statistiche sono state eseguite utilizzando il modello probabilistico GEV. L'analisi svolta consente di individuare le relazioni che permettono la stima puntuale dell'altezza di pioggia, compresa per 24, 48, 72, 96 e 120 ore, per assegnati valori del tempo di ritorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 anni).

5.1 Metodologia

Nel presente lavoro è stato reperito il quadro storico di riferimento (1916-2003) delle informazioni pluviometriche, con durate da 1 a 5 giorni, relativo ad ogni sensore presente sul territorio regionale. Tali informazioni hanno permesso di valutare, in termini di probabilità di ricorrenza (tempo di ritorno), l'evoluzione degli eventi meteorologici misurati dal sensore stesso. L'intervallo temporale considerato è stato ritenuto il più idoneo per la valutazione del rischio da frana, dal momento che l'analisi stessa degli eventi storici franosi ha confermato che le attivazioni delle frane, dovute ad eventi di sola pioggia giornaliera, rappresentino un numero piuttosto esiguo (4/5% circa) sul totale analizzato. Le serie storiche dei massimi annuali delle piogge sono state poi elaborate con metodi statistici di tipo puntuale in modo da valutare le precipitazioni con assegnato valore del tempo di ritorno T nella stazione di interesse.
La tecnica di analisi regionale di frequenza delle altezze di pioggia, utilizzata per la costruzione delle soglie pluviometriche, è del tutto simile a quella adottata nell'ambito del Progetto VAPI del CNR-GNDCI (metodologia utilizzata anche da Arpa Piemonte 2004 e da Prof. Ing. A. Brath 2004, per calcolare le soglie pluviometriche della Regione Emilia-Romagna, con durata da 1 a 24) ed è fondata sull'approccio teorico caratteristico del metodo della "grandezza indice".
Ricavate le altezze di pioggia massime annuali di durata compresa fra le 24 e le 120 ore (1-5 giorni), ed ipotizzando che le distribuzioni di probabilità dei massimi (per area e durata stabilita) siano fra loro identiche a meno di un fattore di scala, risulta sufficiente definire:

- un'unica distribuzione di frequenza adimensionale o '*curva di crescita*', valida per l'intera '*regione omogenea*';
- una legge che, al variare della posizione all'interno dell'area omogenea, definisca il fattore di scala o '*grandezza indice*'.

La determinazione dell'altezza di precipitazione viene pertanto ricondotta alla risoluzione dei due differenti aspetti: la stima del fattore di crescita e la stima della grandezza o pioggia indice.
Pertanto l'evento meteorico $h(d,T)$ viene espresso come:

$$h(d,T) = m_d K(d,T) \qquad (1)$$

dove m_d definisce la '*grandezza indice*' e K(d,T) definisce la distribuzione di frequenza adimensionale o '*curva di crescita*'.
La grandezza indice è una grandezza propria dell'area indagata e viene generalmente posta pari al valore medio dei massimi annuali dell'altezza di pioggia di durata d considerata.
Il fattore di crescita esprime il legame tra l'altezza di precipitazione ed il tempo di ritorno T ed assume validità regionale, ovvero rappresenta un valore comune a tutte le stazioni pluviometriche considerate nell'area omogenea.

COPIA

Al fine di caratterizzare dal punto di vista probabilistico le piogge intense, si è deciso di adottare, nel presente lavoro, la Distribuzione Generalizzata del Valore Estremo - GEV - (Jenkinson, 1969), che riassume in sé tutte e tre le distribuzioni dei valori estremi (EV1, EV2 ed EV3) a seconda del variare di k.
La sua funzione di probabilità cumulata ha la seguente espressione:

$$P(x) = \exp\left\{-\left[1-\frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \qquad \text{per } k \neq 0 \qquad (2)$$

dove ξ è un parametro di posizione, α un parametro di scala e *k* un parametro di forma. La distribuzione di Gumbel si ottiene dalla (2) ponendo k=0.
Il valore medio μ di X rappresenta la grandezza indice. La curva di crescita della variabile $X'=X/\mu$ è formalmente identica all'equazione sopra descritta, con parametri $\xi'=\xi/\mu$, $\alpha'=\alpha/\mu$ e $k'=k$.
Il coefficiente di asimmetria *CS* e di variazione *CV* delle due variabili X e X' coincidono tra loro. Ciò permette, per la stima dei parametri della distribuzione teorica, di potere utilizzare la tecnica regionale basata sul metodo dei momenti lineari (*L-moments*), proposto da Hosking (1990, 1991). I momenti lineari sono quantità analoghe ai momenti convenzionali ma sono stimati sulla base di combinazioni lineari di statistiche di diverso ordine. Quantità analoghe ai rapporti di momenti convenzionali quali il coefficiente di variazione CV, il coefficiente di asimmetria CS ed il coefficiente di appiattimento (o kurtosi) sono i rapporti dei momenti lineari: L-CV, L-CS e L-kurtosi. Utilizzando tale procedimento è stato quindi possibile ricavare i valori dei momenti lineari regionali per ciascuna stazione pluviometrica considerata, in relazione alle diverse durate dell'evento di precipitazione analizzato. La determinazione dei momenti lineari ha permesso, successivamente, di parametrizzare la distribuzione probabilistica utilizzata e valutare i quantili di precipitazione per le durate ed i tempi di ritorno sopra descritti.
Sono disponibili, in allegato al presente documento, i valori degli indici pluviometrici h(d,T), espressi in mm di pioggia, valutati tramite l'analisi regionale sopra descritta.

COPIA

6. DETERMINAZIONE DELLE SOGLIE PLUVIOMETRICHE PER INNESCO FRANE

6.1 Introduzione

Il legame tra il regime delle precipitazioni e la frequenza delle frane viene illustrato nel grafico in figura 6.1 dove si evidenzia la correlazione tra la distribuzione stagionale delle frane con l'andamento delle medie mensili delle precipitazioni (1950-2001), elaborato per alcune stazioni pluviometriche di ciascuna provincia ritenute "*caratteristiche*", perché prossime a zone particolarmente dissestate.
L'analisi del database storico delle frane dimostra non solo come a periodi di eccezionale piovosità corrispondano periodi di eccezionale franosità, ma che le variazioni mensili nella frequenza delle frane ben si accordano con le variazioni mensili nella quantità di precipitazione. Infatti dai grafici sotto riportati si può notare che:
- nella distribuzione mensile della piovosità risultano esserci due massimi (autunnale e primaverile) e due minimi (estivo e invernale); nella frequenza mensile delle frane si hanno pure due massimi, uno primaverile e uno autunnale; in particolare per le frane il massimo autunnale è novembre che risulta essere anche il mese autunnale più piovoso. È da notare tuttavia che, anche se le piogge autunnali cominciano a settembre e sono rilevanti nel mese di ottobre, la maggior parte dei fenomeni di instabilità è concentrata nel mese di novembre. Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che le acque meteoriche impiegano un tempo lungo per imbibire i suoli argillosi essiccati e fratturati durante il periodo estivo a testimonianza di quanto sia fondamentale il grado di saturazione del suolo al momento dell'evento meteorologico che innesca le frane.
- il massimo secondario di franosità è individuato nei mesi di marzo e aprile. La frequenza dei movimenti avvenuti a marzo risulta in anticipo rispetto al mese primaverile più piovoso che risulta essere aprile. Tale anticipo può essere giustificato considerando che nel mese di marzo un altro fattore che apporta contributi idrici al suolo è lo scioglimento delle nevi.

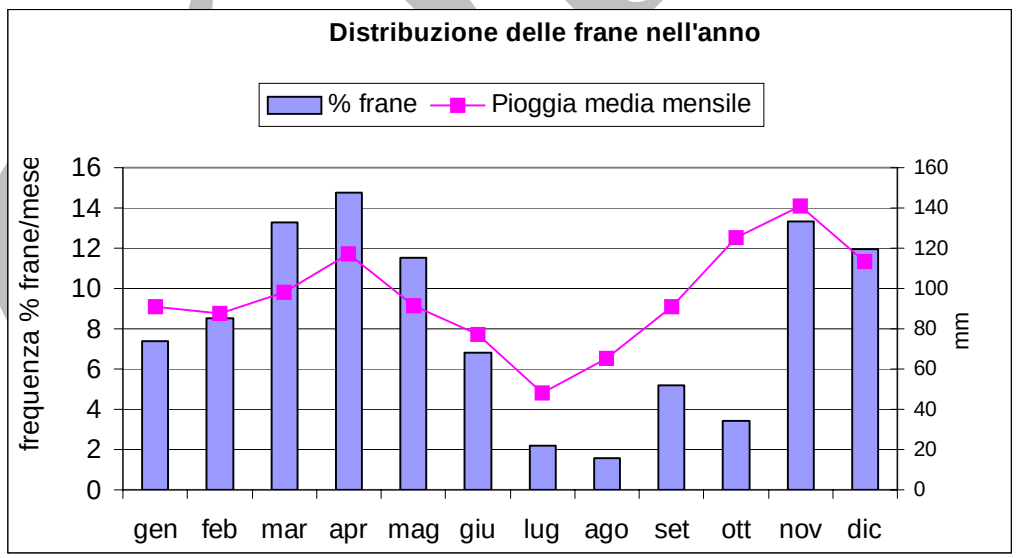


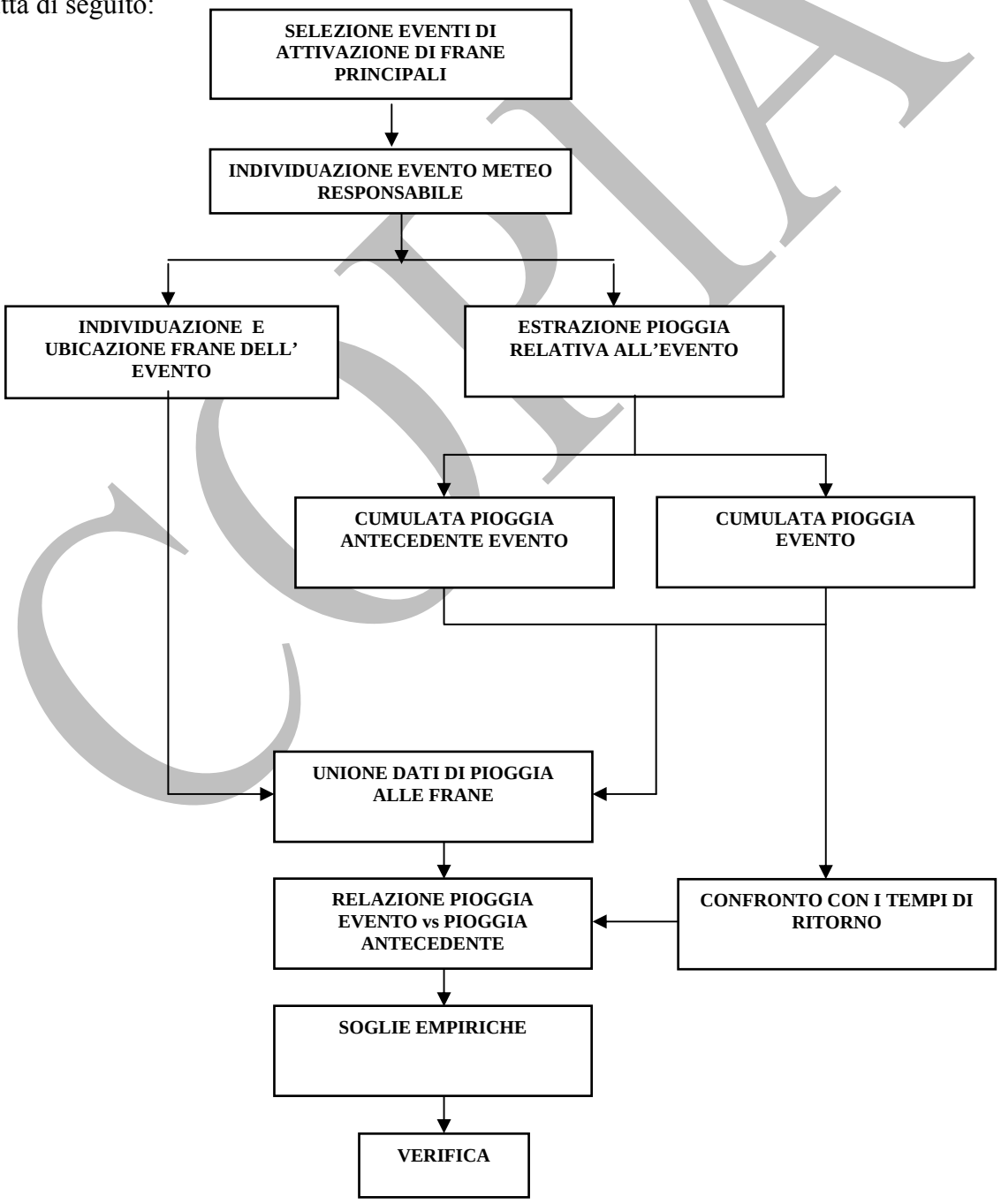
Figura 6.1: Ripartizione dei franamenti durante l'anno e andamento medio delle precipitazioni mensili.

Per individuare i rapporti diretti che intercorrono tra le grandezze pluviometriche e gli inneschi dei fenomeni franosi ad esse correlabili, è necessario definire una quantità di precipitazione minima corrispondente alla soglia di attivazione. La definizione della '*soglia di pioggia critica*' è estremamente complessa, poiché dipende da numerose variabili tra loro interagenti quali, caratteristiche litologiche e geotecniche del suolo e del substrato roccioso, parametri morfologici, di

uso del suolo, di temperatura e umidità dell'aria. Molti parametri sono inoltre variabili nel tempo e nello spazio pertanto dal punto di vista teorico anche la soglia di pioggia è variabile in funzione del tempo.
Nel presente lavoro viene adottato un approccio empirico basato sullo studio degli eventi meteorologici più importanti degli ultimi 50 anni che hanno innescato un elevato numero di frane. Visto che l'obiettivo preposto è la comprensione dell'evento meteorologico che produce un fenomeno franoso, è stata considerata tutta la pioggia di evento di durata variabile (da 1 a 5 giorni) e non quella del singolo giorno di innesco dei fenomeni franosi; infine per determinare le soglie empiriche la pioggia di evento è stata correlata con la pioggia dei 15, 30 e 60 giorni antecedenti all' evento analizzato.

6.2 Metodologia

La metodologia adottata per la definizione di soglie è riportata nel diagramma di flusso (figura 6.2) e descritta di seguito:



COPIA

Dal database generale delle frane storiche sono state selezionate solo quelle con data di attivazione completa (attendibilità da 1 a 3). È stato notato che molte attivazioni o riattivazioni di frane sono avvenute nello stesso giorno o nella stessa settimana o mese perché sono spesso legate agli stessi eventi meteorologici. In questo contesto è stato definito "*evento meteorologico*" una sequenza continua di giorni piovosi intervallati al massimo da un giorno senza pioggia (24h<5mm). Quindi sono stati selezionati i principali eventi meteorologici che hanno generato un numero di frane superiore a 10 nel mese e che hanno coinvolto tutte e tre le province dell'area pilota (tabella 6.1). Tuttavia sono stati presi in esame anche eventi meteorologici che hanno generato un numero di frane inferiore a 10, se seguiti a distanza di pochi giorni da un altro evento per il quale si sono innescati altri franamenti.
È stato scelto come evento da studiare anche Aprile 1956 seppur ad esso sono associate solo 8 franamenti poiché questi ultimi risultano tutti datati con precisione lo stesso giorno.

Tabella 6.1 : principali eventi meteorologici dal 1939 al 2002 e relative frane attivatesi.

DATA EVENTO	NUMERO ATTIVAZIONI
29 Maggio – 2 Giugno 1939	248
6-13 Febbraio 1951	17
22-27 Febbraio 1951	19
30 Aprile 1956	8
16-17 Aprile 1958	9
30 Novembre – 6 Dicembre 1959	44
10-14 Dicembre 1959	38
13-18 Febbraio 1960	23
19-20 Aprile 1960	74
30 Aprile 1 Maggio 1960	14
14-16 Marzo 1964	18
28 Marzo – 4 Aprile 1964	65
10-15 Aprile 1965	5
17-20 Aprile 1965	14
4-6 Novembre 1966	66
8-11 Settembre 1972	28
15-16 Settembre 1972	16
24-26 Settembre 1973	40
28-30 Aprile 1974	37
3-5 Gennaio 1977	8
12 Gennaio 1977	13
13-16 Aprile 1978	52
8-10 Novembre 19882	19
30 Novembre – 3 Dicembre 1982	15
24-26 Novembre 1990	68
5-9 Dicembre 1992	32
10-14 Giugno 1994	85
8-9 Ottobre 1996	20
3-6 Dicembre 2002	52
18–20 Dicembre 2002	20
TOTALE	1165

Sono state attribuite all'evento meteo anche quelle frane per le quali la data di innesco è in leggero ritardo (da uno a circa 10 giorni) rispetto all' evento piovoso di una certa intensità. Tale ritardo è dovuto in parte a una imprecisione di segnalazione (può essere confusa la data di segnalazione con

COPIA

la data di innesco) e in parte perché alcuni fenomeni si manifestano o producono danni visibili con un ritardo rispetto alla conclusione dell'evento di pioggia. Poiché l'obiettivo è la ricerca dell'evento piovoso che ha innescato l'evento di frana, le altezze di pioggia corrispondenti sono state ricondotte alla data di fine evento meteo.
Inoltre ai franamenti, che hanno data di attivazione indicata con un intervallo di giorni (per esempio, la frana si è attivata tra 25-26 aprile 1956), è stato assegnato un giorno esatto di innesco che è stato deciso essere coincidente con la fine dell'evento meteorologico in modo da considerare tutta la pioggia. Nei casi in cui la frana riporta il giorno esatto di innesco, che talvolta precede la fine dell'evento meteo, è stata considerata l'altezza di pioggia fino a quel momento.

Dalla data esatta di innesco (giorno/mese/anno) sono stati estratti i seguenti valori di pioggia partendo dai dati di precipitazione giornalieri (mm/24h) registrati dalle stazioni meccaniche:

- pioggia giornaliera del giorno innesco
- pioggia cumulata dal giorno di innesco per 2, 3, 4 ,5, 6, 7 giorni (per caratterizzare l'evento) e 15, 30, 60, 90 giorni (per comprendere le condizioni di saturazione al suolo).

Tabella 6.2: Esempio di tabella di estrazione dati per le frane con data innesco il 13 giugno 1994 (evento 10-14 giugno 1994).

Stazione	dato1g	dato2g	dato3g	dato4g	dato5g	dato6g	dato7g	dato15g	dato30g	dato60g	dato90g
Baiso	78	167,6	177,4	187,2	187,2	187,2	187,2	187,2	201,6	296,6	390,6
Barco	32,6	113,6	123,6	135,8	135,8	135,8	135,8	136,2	209,8	325	462,6
Barigazzo	63	215	241	247	247	247	247	247	280	396	553
Bologna Idro	39,2	107,4	120,2	139	139	139	139	141,8	152,8	214,4	310,8
Bologna San Luca	27	100,4	113	131,4	131,4	131,6	131,6	135,8	147,6	211,8	295,2
Bombiana	30,4	114,4	124,6	127,8	127,8	127,8	127,8	128	162,8	245,4	311,8
Borgo Tossignano	67,8	129,8	206	206	206	206	206	223,8	236,8	289	370,2
Calderara di Reno	47,4	86,8	99,2	103,2	103,2	103,2	103,2	108,4	122	186,4	282,4
Canova	43	85	144	201	249	249	249	249	272	442	579
Casola Valsenio	44,4	179,4	189,6	200,6	200,6	200,6	200,6	206	218,4	277,2	369
Castel del Rio	42	122	172,1	192,3	192,3	192,3	192,3	192,3	196,3	285,6	377,2
Castellarano	48	139	150	155	155	155	155	155	173	266	335
Cognento	26,6	32,8	33,4	35,4	35,4	35,4	35,4	54	85,4	153,2	241,6
Collagna	64	158,7	171,9	178,5	178,5	178,5	178,5	178,5	214,3	318,7	470,1
Cottede	44	132,2	163,6	175,8	175,8	175,8	175,8	175,8	238,8	375,4	533,2
Diga del Brasimone	43	143	173	180,4	180,4	180,4	180,4	180,4	234,6	372,8	491,2
Diga di Pavana	42,4	149,4	176,6	179	179	179	179	179	218	338,4	462,2
Diga di Suviana	39,6	143,4	165,8	169,8	169,8	169,8	169,8	169,8	207,2	313,8	406,6
Farneta	59	172,6	186,4	192,4	192,4	192,4	192,4	192,4	213,2	343	464
Febbio	44	168	187	195	195	195	195	195	220	333	470

Dalle cumulate delle precipitazioni sono stati ricavati i seguenti parametri (tabella 6.3):

- **Pioggia d'evento (Pe)**: rappresenta la cumulata di pioggia dell'evento piovoso partendo dal giorno di innesco della frana fino a fine evento piovoso. La pioggia dell'evento è stata stimata considerando i valori di pioggia cumulata da 1 a 7 giorni;
- **Pioggia d'evento normalizzata (NPe%)**: è il rapporto tra pioggia d'evento (Pe) e la pioggia totale annua del pluviometro considerato;
- **Pioggia antecedente (Pa)**: rappresenta la cumulata di pioggia dell'intervallo antecedente considerato, sottratta della pioggia d'evento. La pioggia antecedente è stata stimata considerando i valori di pioggia cumulata dai 15 ai 90 giorni antecedenti;

COPIA

- **Pioggia antecedente normalizzata (Npa%)**: è il rapporto tra la pioggia antecedente (Pa) e la pioggia totale annua del pluviometro considerato.

La pioggia normalizzata rispetto alla media annua permette di omogeneizzare i dati e di confrontare valori registrati in zone dove generalmente le quantità di precipitazione sono diverse. Inoltre ad ogni evento franoso riscontrato, sono stati associati i dati di precipitazioni registrati dal pluviometro più vicino e appartenente allo stesso bacino idrografico.

Tabella 6.3: Esempio dei dati utilizzati

ID frana	Anno	Giorno	Mese	Data	Stazione	durata	TR (anni)	Pe	Pa30	Pa60	Npe%	Npa30%	Npa60%
605	1992	9	12	10-dic	Riola di vergato	5	2	108,8	25,4	173,0	11,1	2,6	17,6
700	1992	9	12	9-dic	Vergato	4	2\5	107,4	36,6	160,4	10,7	4,1	18,1
710	1992	9	12	10-dic	Vergato	4	2\5	107,4	36,6	160,4	10,7	4,1	18,1
1001	1994	13	6	13-giu	Baiso	4	50\100	187,0	14,6	109,6	22,0	1,7	12,9
1030	1994	13	6	13-giu	Monte S.Pietro	3	50	186,0	58,6	158,6	21,5	6,8	18,3
1210	1996	9	10	07-ott	Borgo Toss.	3	10\20	175,0	216,4	305,6	19,3	23,9	33,8
1212	1996	9	10	08-ott	Fontanaluccia	3	2\5	126,8	98,0	181,0	9,6	7,4	13,7

6.3 Analisi dei risultati

Partendo dalla pioggia dell'evento (Pe) che ha innescato le frane, sono stati considerati i seguenti parametri:

- durata dell'evento (in giorni);
- tempo di ritorno dell'evento in base alla durata così da avere una stima qualitativa della gravità dell'evento meteorologico.

Sono emerse le seguenti considerazioni:

1. La maggior parte di attivazioni di frana prese in esame (84%) avviene dopo una pioggia continua che dura da 3 a 5 giorni (figura 6.3);
2. Il 28% delle frane si sono innescate a seguito di eventi di pioggia con tempo di ritorno inferiore ai 2 anni; per questi casi è necessario valutare le condizioni di saturazione del suolo stimando la pioggia precedente. Il 38% dei casi avviene con pioggia evento con tempo di ritorno tra i 2 e i 10 anni; i casi estremi invece rappresentano solo il 34% da tempo di ritorno maggiore di 20 anni (figura 6.4);
3. I pochi franamenti innescati solo con un giorno di pioggia possono dipendere principalmente dalla quantità di pioggia antecedente poiché la pioggia dell'evento ha tempo di ritorno minore o uguale a 2. Pochi franamenti sono avvenuti dopo un giorno di pioggia intensa con tempo di ritorno maggiore di 20 anni;
4. Dalla matrice (tabella 6.4) si può notare che la percentuale di franamenti più alta, classificati in base alla durate di evento, si ha per piogge con tempi di ritorno minore di due anni o comprese tra i due e i cinque anni (per la durata di 4 giorni). Questi sono i casi più diffusi di attivazione di movimenti franosi per i quali vanno considerate le piogge antecedenti;
5. Aumentando la durata dell'evento aumenta anche il tempo di ritorno dell'evento della pioggia (figura 6.5).

COPIA

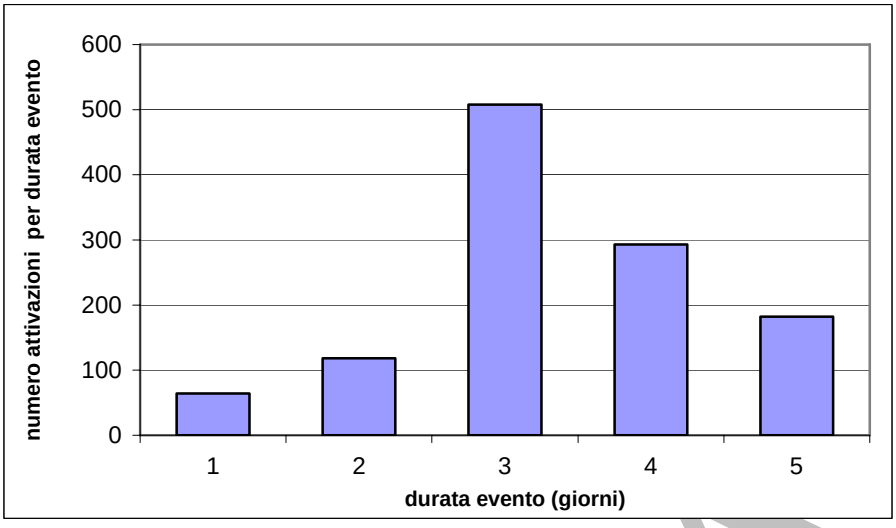


Figura 6.3: Numero di attivazioni di frane suddivise per la durata dell'evento meteorologico da 1 a 5 giorni.

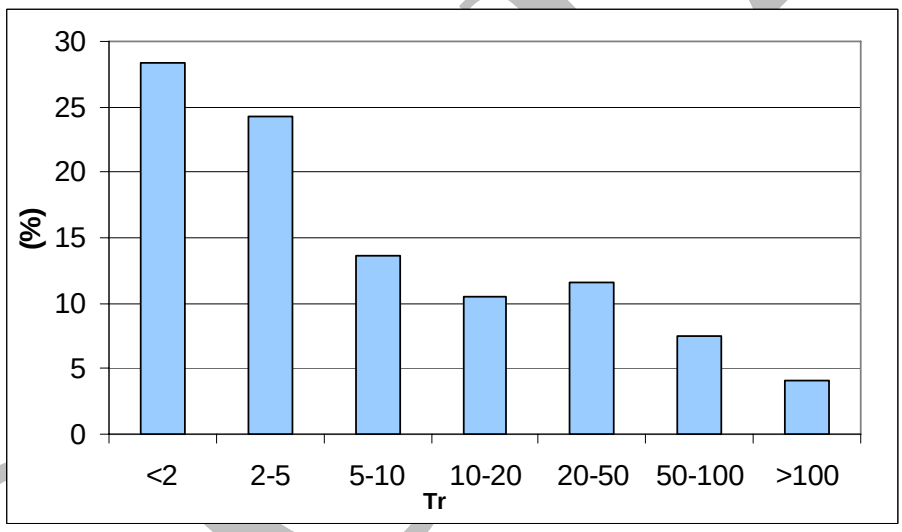


Figura 6.4: Percentuale del numero di attivazioni di frane suddivise per dell'evento meteorologico.

Tabella 6.4: Matrice con la percentuale delle occorrenze di frane suddivise per durata dell'evento e Tempo di ritorno della pioggia dell'evento.

Durata TR	**1gg**	**2gg**	**3gg**	**4gg**	**5gg**	**Totale**
<2	3,3	4,9	10,3	7,4	2,6	28,4
2-5	1,7	3,1	4,9	10,0	4,5	24,3
5-10	0,0	1,2	8,2	0,9	3,3	13,9
10-20	0,0	0,5	6,7	1,2	2,1	10,5
20-50	0,3	0,1	7,0	1,8	2,5	11,6
50-100	0,3	0,1	5,3	1,7	0,1	7,5
>100	0,0	0,3	1,2	2,1	0,5	4,1
totale	5,5	10,1	43,6	25,2	15,6	100

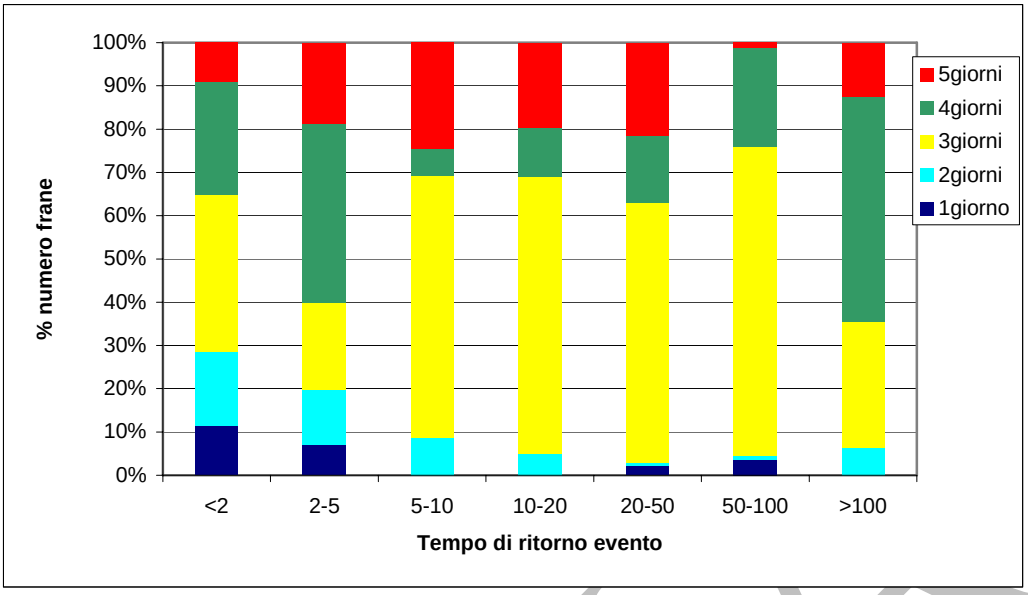


Figura 6.5 percentuale di attivazioni di frane suddivise per il tempo di ritorno dell'evento e in relazione alla durata dell'evento.

Infine calcolando per ogni evento la pioggia media caduta nei trenta giorni precedenti e confrontando quest'ultima con la media mensile del mese dell'evento (figura 6.6) si può notare che:

- nella maggior parte degli eventi la pioggia media dei trenta giorni antecedenti supera la media mensile. In questi casi la pioggia d'evento è più bassa a testimoniare il fatto che in condizioni di suolo saturo basta un quantitativo di pioggia inferiore per far innescare le frane;
- nei casi in cui la pioggia media dei trenta giorni antecedenti è inferiore alla media mensile, pioggia di evento è elevata e supera la pioggia media mensile.

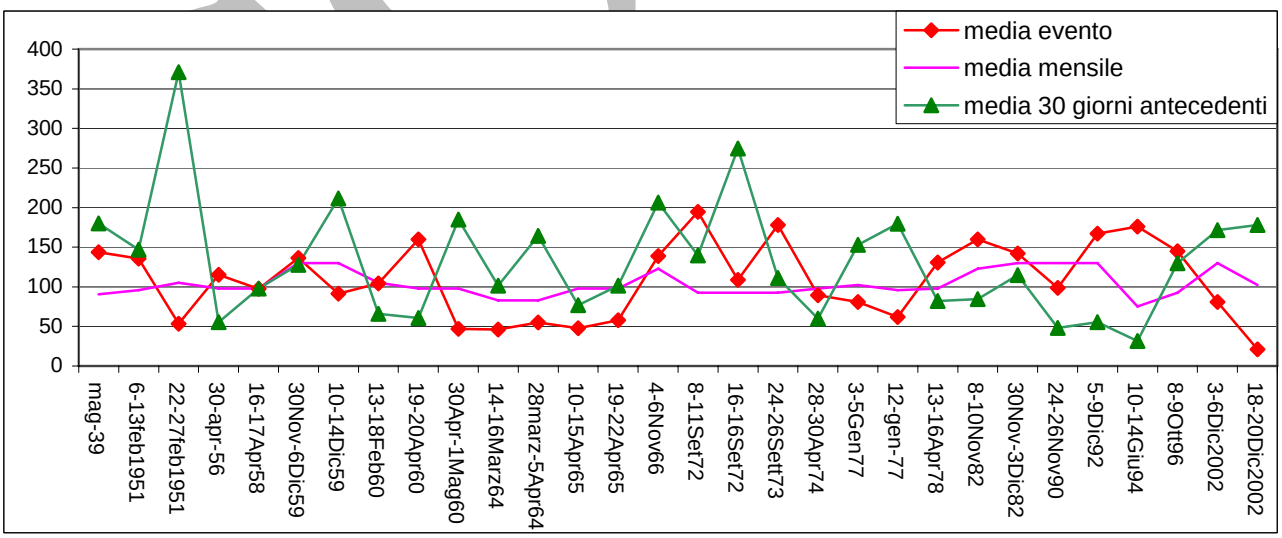


Figura 6.6: Correlazione tra la pioggia media di evento, pioggia media dei 30 giorni antecedenti l'evento con la pioggia media mensile e

6.4 Determinazione di soglie pluviometriche per innesco movimenti franosi

Come ultima fase si è cercato di correlare la pioggia di evento normalizzata con la pioggia antecedente normalizzata, sulla base di quanto descritto nel paragrafo 6.2; in questa operazione sono stati utilizzati tutti i dati pluviometrici puntuali associati ad ogni evento franoso innescatosi durante gli eventi meteorologici prescelti. La pioggia antecedente considerata è stata quella sui 15, 30, 60 giorni antecedenti; dai grafici riportati (figure 6.7, 6.8 e 6.9) si può notare che il periodo antecedente più significativo risulta essere 30 giorni poiché è evidente che con l'aumento della pioggia antecedente diminuisce quella di evento; invece se si considera la pioggia dei 15 giorni antecedenti si hanno parecchi eventi con pioggia antecedente nulla e se si considerano i 60 giorni la nuvola di punti risulta essere più compatta.

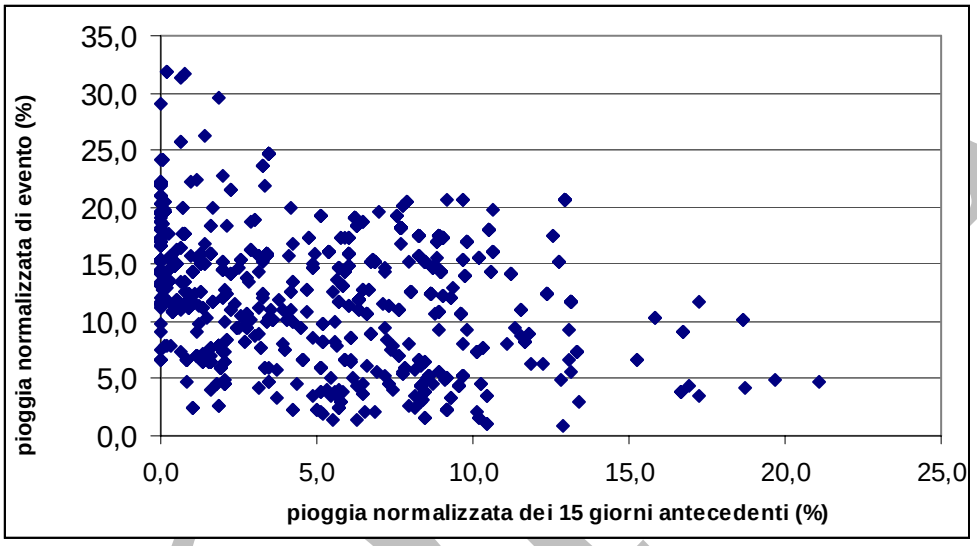


Figura 6.7: Pioggia di evento normalizzata - Pioggia antecedente (15gg) normalizzata.

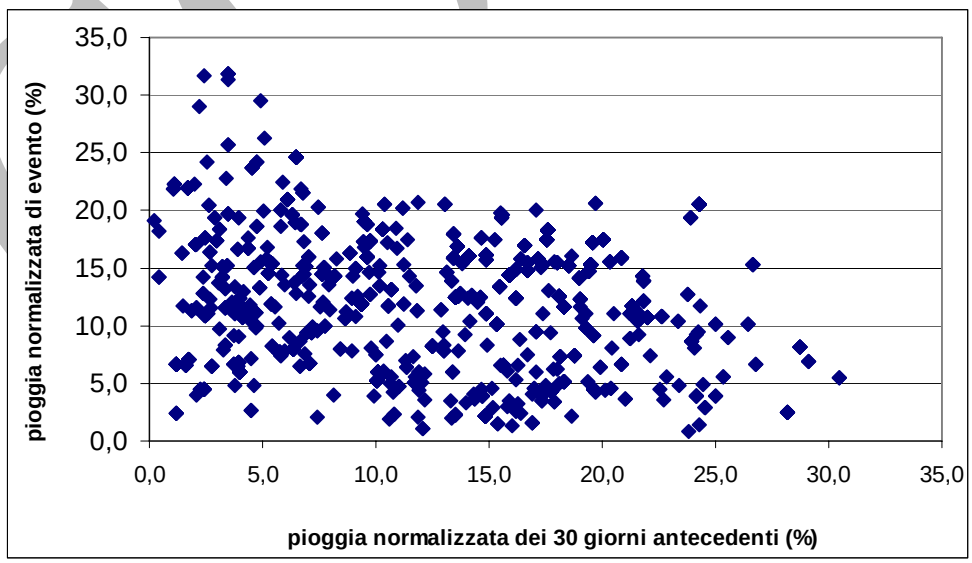


Figura 6.8: Pioggia di evento normalizzata - Pioggia antecedente (30gg) normalizzata.

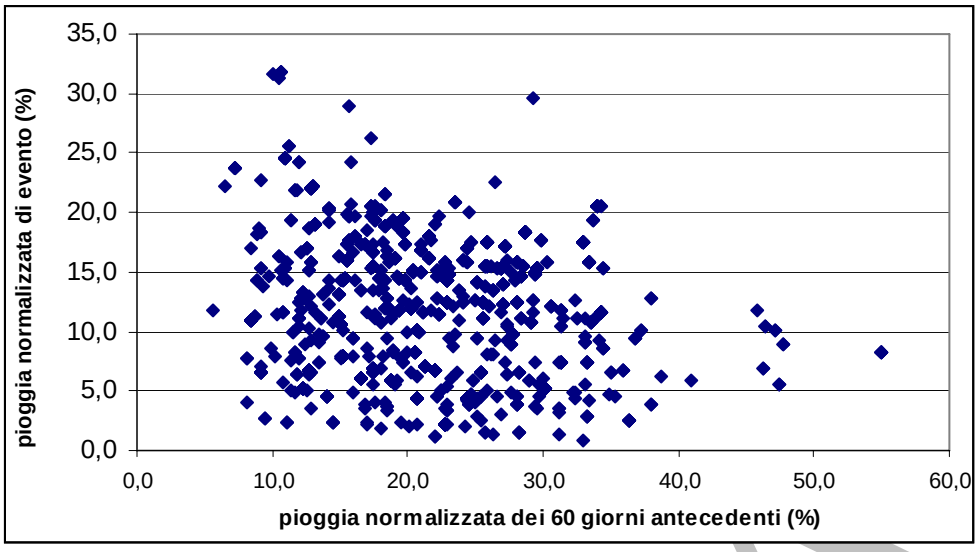


Figura 6.9: Pioggia di evento normalizzata - Pioggia antecedente (60gg) normalizzata.

Partendo dalla pioggia antecedente dei 30 giorni (figura 6.8), è stata ricercata una curva che costituisse una soglia statisticamente significativa della ricorrenza degli eventi franosi. A tale scopo è stata prima ricercata la funzione rappresentativa dell'intera distribuzione dei punti. Tale funzione, denominata "**Curva A**" è stata prescelta dopo aver testato 2979 funzioni non lineari (figura 6.10). La sua equazione è del tipo:

$$y = \frac{a}{\sqrt{1 + 2a^2bx}}$$

con X>0, a>0, b>0

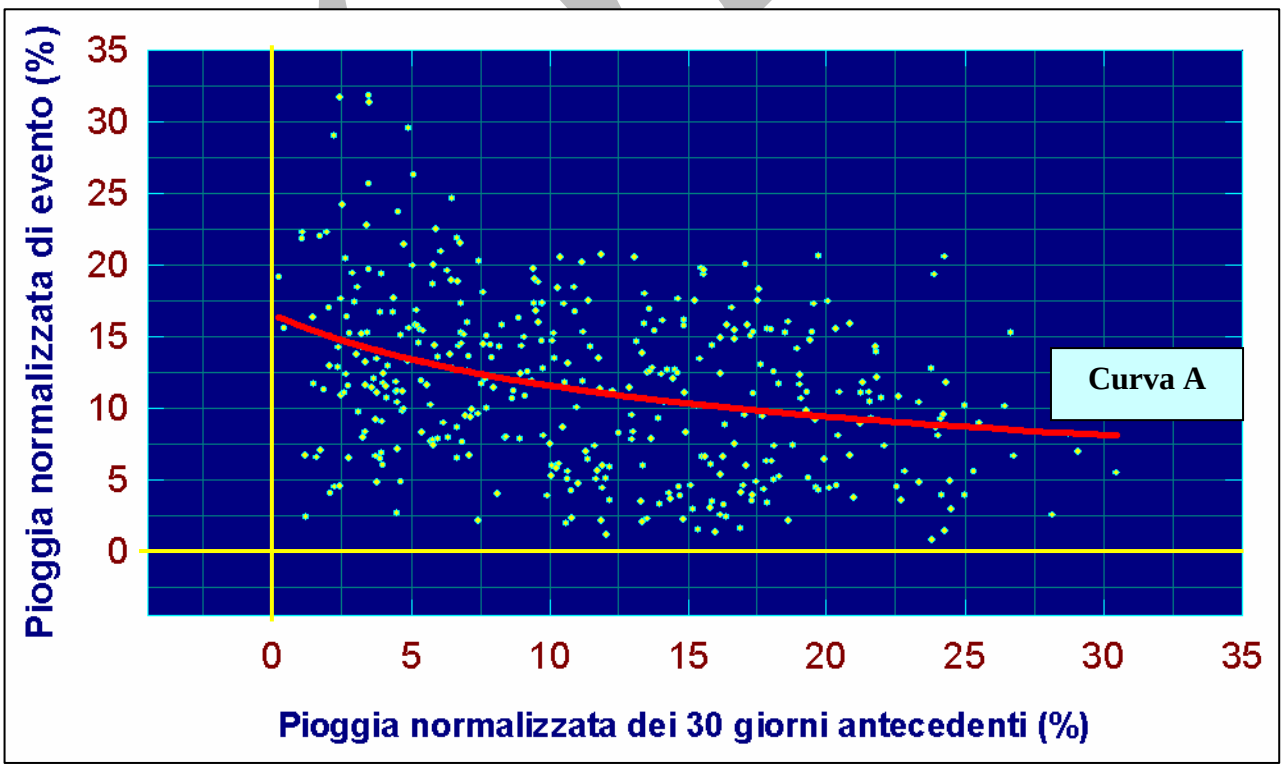


Figura 6.10: Funzione interpolante la pioggia di evento considerata.

Come si può notare, la distribuzione dei punti è notevolmente dispersa e pertanto nessuna curva è in grado di interpolare con ottima precisione i dati. La funzione più coerente, risulta avere coefficiente di correlazione RQ comunque molto basso. I suoi parametri statistici sono:

-**a**= 16,5591
-**b**= 0,0002
-**R^2**= 0,1091
-**DOF R^2**= 0,1044
-**Std Error**= 5,5988
-**F Statistic**= 46,4087

La funzione scelta, è stata successivamente traslata verso il basso in modo da separare convenzionalmente il 10% dei punti al di sotto della curva dal 90 % al di sopra.
Essa costituisce la soglia inferiore o **soglia ordinaria** (curva "ordinaria" di figura 6.11). I parametri necessari per la costruzione della curva sono:

$$y = \frac{a}{\sqrt{1 + 2a^2bx}}$$ con **a** = 9,67, **b** = 0,002

Il suo significato è che statisticamente solo il 10% delle attivazioni considerate sono accadute con condizioni di precipitazioni inferiori alla soglia stabilita: tale numero risulta ragionevolmente basso (circa 110 eventi in circa 50 anni) anche in considerazione della presenza al di sotto della curva di numerose segnalazioni che appaiono inspiegabilmente legate a condizioni di pioggia ordinarie o addirittura siccitose e che possono essere attribuite a varie cause, legate anche a possibili a errori strumentali o errori di segnalazione.
La funzione individuata è stata utilizzata come soglia solo entro un intervallo di valori, delimitato da una retta parallele all'asse Y (retta R1 di figura 6.11) che individua la pioggia cumulata del mese antecedente pari al 3,4% della pioggia annuale media del pluviometro considerato. La retta individua il 10-percentile dei punti ordinati per pioggia antecedente: il suo significato statistico è che valori di pioggia antecedente inferiori risultano troppo poco numerosi per essere significativi mentre dal punto di vista fisico il contributo della pioggia antecedente può essere considerato ininfluente (infatti si tratta di piogge cumulate oscillanti tra 30 e 60 mm, inferiori alla metà della pioggia media mensile). A partire da tale valore X la soglia è stata stabilita sulla base del tempo di ritorno (TR) della precipitazione d'evento, osservando che gli eventi compresi nella fascia considerata hanno per la maggior parte TR maggiori di 2 anni.
Alla funzione di soglia ordinaria è stata inoltre affiancata una funzione parallela **soglia moderata** (curva moderata di figura 6.11). I parametri necessari per la costruzione della curva sono:

$$y = \frac{a}{\sqrt{1 + 2a^2bx}}$$ con **-a**= 14.49, **-b**= 0.00035

Essa separa, in termini di tempi di ritorno, gli eventi con TR<2 anni da quelli superiori. Analogamente la curva è stata interrotta con valori di x<3,4 per le stesse ragioni precedentemente considerate. Nella fascia adiacente all'asse Y la soglia moderata scatta con TR>5 anni per l'evento considerato.

COPIA

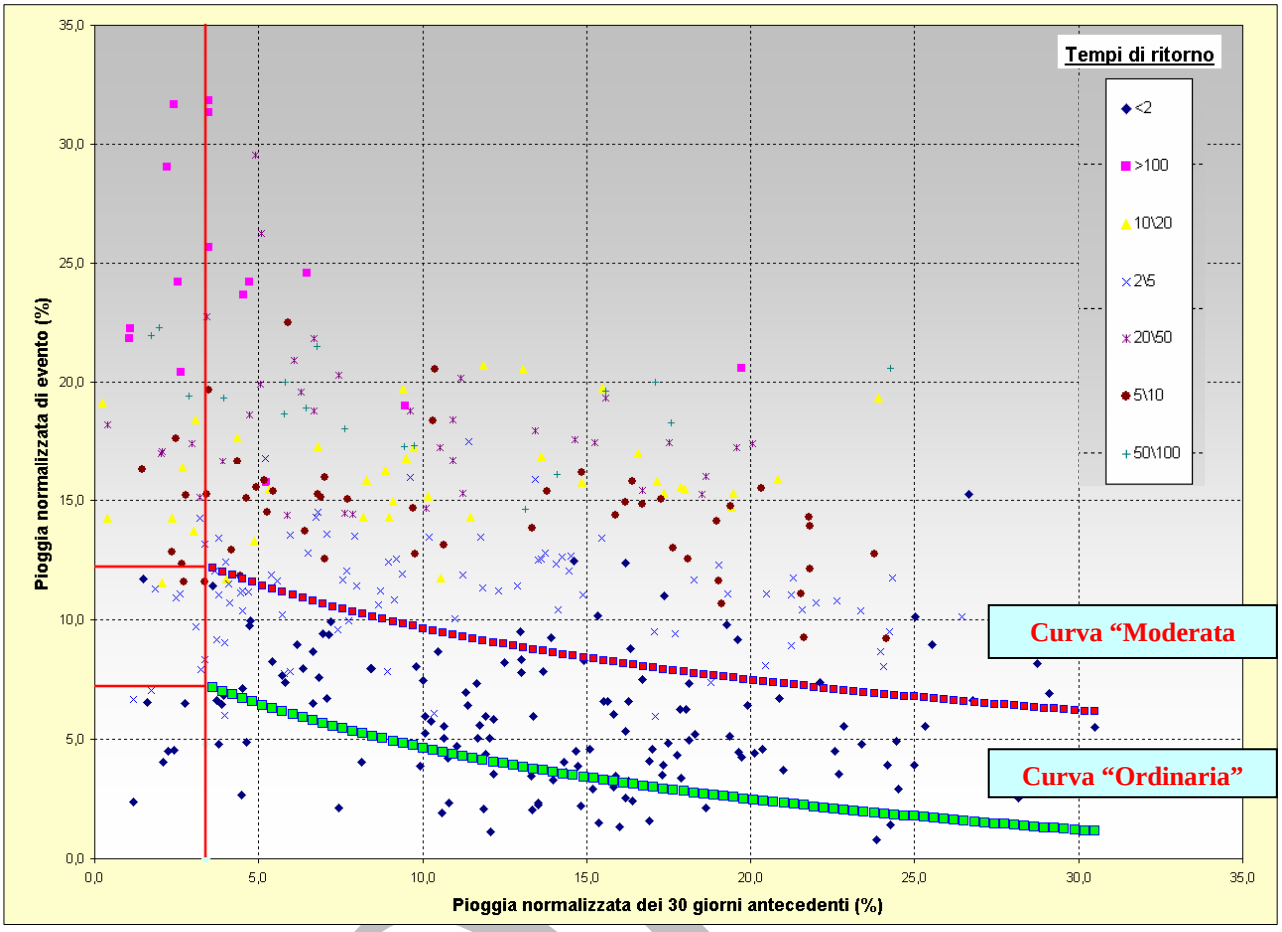


Figura 6.11: Curve previsionali per la soglia ordinaria e moderata.

6.5 Verifica delle curve – soglie

Una parte fondamentale di tutte le metodologie statistiche risulta la verifica dell'attendibilità della metodologia utilizzata. Nel presente lavoro è stato valutato se le curve stabilite rappresentano effettivamente delle soglie critiche per innesco di movimenti franosi.
La verifica è stata eseguita confrontando le piogge dell'evento con le piogge dei 30 giorni antecedenti per un altro campione di attivazioni di frane estratto dal database di partenza. La procedura precedentemente descritta è stata applicata a ventiquattro eventi meteorologici di minore intensità che hanno innescato frane (tabella 6.5); è da notare che l'82% di movimenti franosi è accaduto con piogge di evento con tempo di ritorno inferiore a 2 anni (figura 6.12).
Infine tutti i 213 valori normalizzati di pioggia antecedente e pioggia di evento per ogni movimento franoso sono stati inseriti nel grafico per verificare dove si collocano rispetto alle curve di soglie definite (figura 6.13); si nota che circa 70% dei movimenti franosi si collocano al di sopra della curva di soglia ordinaria e la maggior parte degli eventi sta al di sotto della curva di soglia moderata. Se si considera il fatto che per questa operazione sono stati utilizzati eventi con un numero basso di frane e caratterizzati da piogge non eccezionale (TR<2 anni), è probabile che il 30% delle attivazioni che ricadano sotto la curva di soglia ordinaria siano legate ad altre cause o rappresentano delle segnalazioni di dubbia provenienza.

DATA EVENTO	NUMERO ATTIVAZIONI
16-19 Novembre 1959	12
8-11 Dicembre 1960	4
17-18 Dicembre 1960	7
28-27 Novembre 1965	5
25-22 Febbraio 1968	6
24-26 Marzo 1969	16
3–6 Aprile 1969	13
14 Aprile 1969	5
26-25 Aprile 1972	10
14-17 Febbraio 1979	10
15-19 Novembre 1979	10
10 Marzo 1980	8
14-17 Marzo 1980	7
27 Gennaio 1985	8
10-11 Maggio 1991	11
20-25 Novembre 1991	12
22 Settembre 1994	6
15-18 Dicembre 1985	8
1 Gennaio 1996	10
6-8 Gennaio 1996	8
20-22 Febbraio 1996	13
9-6 Novembre 1999	10
17-18 Novembre 2002	5
24-27 Novembre 2002	10
TOTALE	213

Tabella 6.5: Eventi utilizzati per la verifica delle soglie.

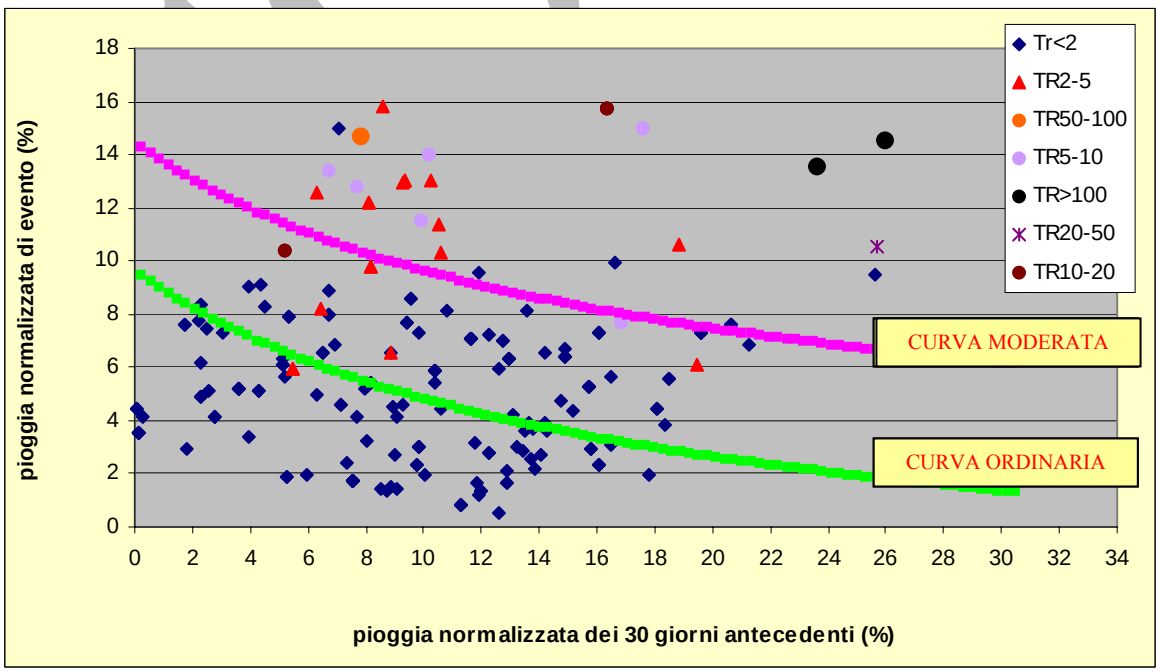


Figura 6.12: Confronto tra le piogge caratterizzanti le attivazioni di frane degli eventi utilizzati per la verifica e le curve. I valori di pioggia sono raggruppati in base al tempo di ritorno della pioggia di evento.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro rappresenta un primo tentativo di determinazione delle soglie di innesco per fenomeni franosi nell'Appennino Settentrionale. L'analisi delle condizioni pluviometriche antecedenti e di evento, relative a oltre 1150 riattivazioni ha consentito la determinazione di una curva di soglia statisticamente basata . L'intervallo significativo di pioggia antecedente scelto è stato quello relativo a 30 giorni, pur non escludendo la possibilità di ricercare funzioni soglia per intervalli maggiori. Tale curva verrà testata con gli eventi che si succederanno nel corso del 2005 sull'intero territorio regionale e contemporaneamente con l'analisi di ulteriori fenomeni avvenuti in passato su altre province della regione limitrofe a quelle oggetto di sperimentazione. Il campione analizzato verrà inoltre suddiviso sulla base di caratteristiche litologiche, stagionali e dimensionali (superficie dei movimenti franosi) al fine di raffinare la funzione sulla base anche di elementi territoriali e temporali (stagionali). Infine verranno effettuati test statistici relativi alla ricerca dei mancati allarmi/falsi allarmi sulla base della registrazione storica delle precipitazioni disponibili.

COPIA

8. BIBLIOGRAFIA

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

- Bertolini G., Pellegrini M., 2001: The Landslides of Emilia Apennines (northen Italy) with reference to those which resumed activity in 1994-1999 period and required Civil Protection interventions. Quaderni di Geologia Applicata 8-2, 27-74.

- Brath A., 2004: Sistema regionale di monitoraggio, valutazione speditiva del rischio idraulico e allertamento ai fini di protezione civile – seconda fase: perfezionamento del sistema. Rapporto inedito della Regione Emilia Romagna Servizio di Protezione Civile Regionale.

- Caine N., 1980: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, Series A 62(1-2), 23-27.

- Cancelli A., Nova R., 1985: Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (Central Alps - Italy). Proceedings of 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 267-272.

- Cannon S.H., Ellen, S.D., 1985: Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. California Geology 38(12), 267-272.

- Caroni E., Maraga F. & Turitto O., 1990: La delimitazione di aree soggette a rischio di inondazione: Un approccio multidisciplinare. Atti XXII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol. 3, 9-21. Cosenza, 4-7 ottobre 1990.

- Ceriani M., Lauzi S., Padovan N., 1992: Rainfall and landslides in the Alpine area of Lombardia Region, Central Alps, Italy. Interpraevent *1992*, Bern, 2, 9-20.

- Chleborad A.F, 2000: Preliminary Method for Anticipating the Occurrence of Precipitation – Induced Landslides in Seattle, Washington. Open File Report 00-469 USGS.

- Crosta G.B., 1998: Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. Environmental Geology 35 (2-3), 131-145.

- Crosta G., Frattini P., 2001: Rainfall Thresholds for triggering soil slips and debris flow . Proc. Of EGS 2nd Plinius Conference 2000, Mediterranean Storm, Siena, 463-488.

- Crosta G., Dal Negro P., Frattini P., 2004: Distributed modelling of shallow landsliding in volcanoclastic soils. Engineering Geology, 73

- Crozier, M.J.,Eyles R.J., 1980: Assessing the probability of rapid mass movment. In the New Zealand institution of Engineers – Proceedings of Technical Groups (ed.), Proc. Third Australia - New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, 2.47-2.51.

- Crozier M.J., 1997: The climate-landslide couple: a southern hemisphere perspective. In: Matthews, J.A., Brunsden, D., Frenzel, B., Gläser, B. & Weiß, M.M. (eds.): Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene. European Science Foundation, Palaeoclimate Research.- Gustav Fischer, 12, 333-354.

- Glade T., Crozier M. J., Smith P., 2000: Applying probability determination to refine landslide- triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure and Applied Geophysics* 157(6-8): 1059-1079.

COPIA

- Govi M., Mortara G., Sorzana P., 1985: Eventi idrologici e frane. *Geologia Applicata & Ingegneria*, Bari, Italy, 20:2 359-375.

- Govi M. & Turitto O., 1994: Ricerche bibliografiche per un catalogo sulle inondazioni, piene torrentizie frane in Valtellina e Valchiavenna. Associazione Mineraria Subalpina, Quaderni di Studi e di Documentazione, n. 16, 249 p., 3 all.. Torino.

- Govi M. & Turitto O., 1997: Distribuzione spazio-temporale degli eventi estremi nel bacino padano: analisi storica. Atti del Convegno dell'Accademia Nazionale dei Lincei "Eventi estremi: previsioni meteorologiche -e idrogeologia", 55-74. Roma, 5 giugno 1995.

- Hosking J.R.M., 1990: L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, J. R. Stat. Soc., Ser. B., 52(2), 105-124.

- Hosking J.R.M., 1991: Approximations for use in constructing L-moment ratio diagrams. Research report RC-16635, IBM research division, T.J. Watson Research cenetr, Yorktown Heigths, N.Y., Marzo 12, 1991.

- Jenkinson A.F., 1969: Statistics of extremes. In: Estimation of maximum flows. WMO, No. 233, TP 126 (tech. note no. 98), 183-228.

- Keefer D.K., Wilson R.C., Mark R.K., Brabb E.E., Brown III W.M., Ellen, S.D., Harp E.L., Wieczorek G.F., Alger C.S., Zatkin R.S., 1987: Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science* 238 (13 November 1987), 921-925.

- Lollino G., Brunamonte F., Larini G.,Malaguti C., 2001: La sperimentazione del Sistema Inclinometrico Automatizzato nel monitoraggio in continuo della frana di Corniglio (Parma) e ricerca di correlazioni significative fra le precipitazioni e la riattivazione del novembre 1994. Quaderni di Geologia Applicata 8-2, 159-188.

- Lumb P., 1975: Slope failure in Hong Knog. Quaternary Journal Engineering Geologist 8, 31-65.

- Montgomery D.R., Dietrich W.E., 1994: A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research 30, 1153-1171.

- Tropeano D., 1989: Eventi alluvionali e frane nel bacino della Bormida. Studio retrospettivo. Associazione Mineraria Subalpina, Quaderni di studio e documentazione, 10, 155 p..

- White I.D., Mottershead D.N., Harrison J.J., 1996: Environmental systems. 2nd Edition.Chapman & Hall, London, 616 pp.

- Wieczorek G.F., 1987: Effects of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: Costa, J.E., & Wieczorek, G.F. (eds.), Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation. Reviews in Engineering Geology, Geological Society of America, Boulder, CO, 7: 93-104.

- Wieczorek G.F, Morgan B.A., Campbell R.H., 2000: Debris flow hazards in the Blue Ridge of Central Virginia. Environmental and Engineering Geoscience VI 81), 3-23.

COPIA