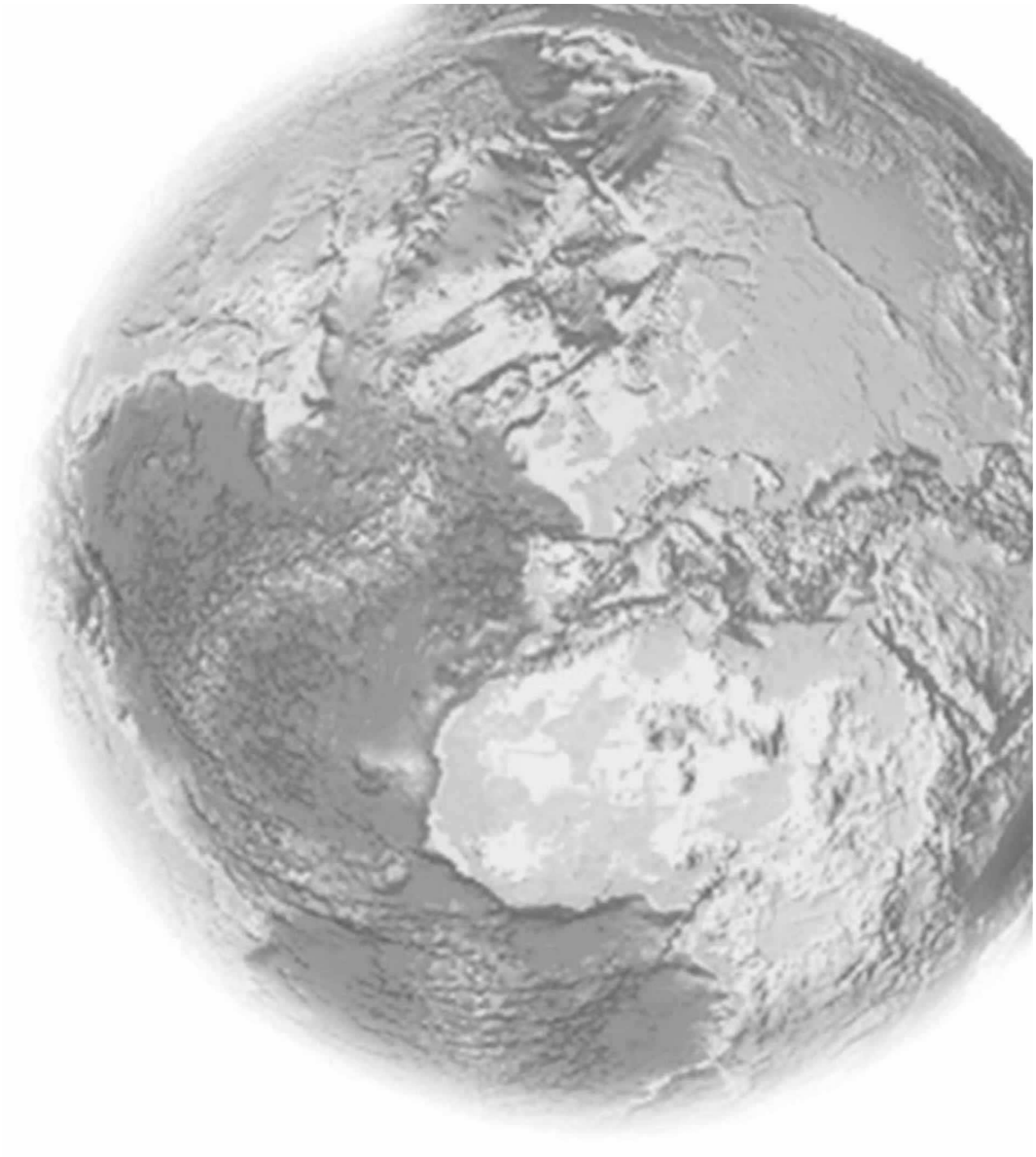
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia



Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica

prevista dall'Ordinanza PCM
del 20 marzo 2003, n. 3274, All.1

Rapporto Conclusivo

bozza - aprile 2004

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata 605 - 00143 Roma
tel 06518601 - fax 065041181
www.ingv.it

Redazione della **M**appa di **P**ericolosità **S**ismica

prevista dall'Ordinanza PCM
del 20 marzo 2003, n. 3274, All.1

Rapporto **C**onclusivo

bozza - **aprile 2004**

Questo documento rappresenta l'adeguamento di risultati della prima fase delle ricerche, descritte nel Rapporto Finale consegnato al Dipartimento per la Protezione Civile nel novembre 2003 e le cui modalità di realizzazione sono descritte nella pagina seguente, alle richieste del board dei revisori istituito dallo stesso Dipartimento.
La realizzazione è stata curata da un Gruppo di Lavoro composto da:

Massimiliano Stucchi (coordinatore)	INGV, Sezione di Milano
Aybige Akinci	INGV, Sezione Roma1
Ezio Faccioli	Politecnico di Milano
Paolo Gasperini	Università di Bologna
Luca Malagnini	INGV, Sezione Roma1
Carlo Meletti	INGV, Sezione di Milano
Valentina Montaldo	INGV, Sezione di Milano
Gianluca Valensise	INGV, Sezione Roma1

Hanno contribuito inoltre: Paola Albini, Salvatore Barba, Roberto Basili, Filippo Bernardini, Romano Camassi, Fabrizio Galadini, Ilaria Leschiutta, Fabrizio Meroni, Carmen Mirto, Giuliana Rubbia, Gianfranco Vannucci, Gaetano Zonno (INGV).

Il board dei revisori comprende:

Julian Bommer	Imperial College, London (uk)
Mariano Garcia	ICTJA-CSIS, Barcelona (es)
Domenico Giardini	ETH, Zuerich (ch)
Paolo Emilio Pinto	Università di Roma La Sapienza
Dario Slejko	INOGS, Trieste.

Alla revisione e al miglioramento dei risultati hanno contribuito anche: Franco Barberi (Università di Roma 3), Gian Michele Calvi (Università di Pavia), Paolo Gasparini (Università di Napoli Federico II) e i componenti della Commissione Grandi Rischi, Sezione Rischio Sismico.

Il documento è citabile come:

Gruppo di Lavoro (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.

Nella prima fase (2003) l'esecuzione delle ricerche e la realizzazione del Rapporto Finale, consegnato a DPC nel novembre 2003, è stata coordinata da un Gruppo composto da:

Massimiliano Stucchi (coordinatore)	*INGV, Sezione di Milano*
Aybige Akinci (responsabile di task)	*INGV, Sezione Roma 1*
Alessandro Amato	*INGV, Centro Nazionale Terremoti*
Luca Malagnini (responsabile di task)	*INGV, Sezione Roma 1*
Carlo Meletti (responsabile di task)	*INGV, Sezione di Milano*
Fabrizio Meroni (responsabile di task)	*INGV, Sezione di Milano*
Giulio Selvaggi	*INGV, Centro Nazionale Terremoti*
Gianluca Valensise (responsabile di task)	*INGV, Sezione Roma 1*
Gaetano Zonno (responsabile di task)	*INGV, Sezione di Milano*

e da

Dario Albarello	*Università di Siena*
Ezio Faccioli	*Politecnico di Milano*
Fabrizio Galadini	*IGAG-CNR*
Paolo Gasperini (responsabile di task)	*Università di Bologna*

istituito dal Presidente dell'INGV con Decreti n.142 del 26 giugno 2003 e n.183 del 24 luglio 2003.

Alle ricerche hanno partecipato:

Paola Albini, Filippo Bernardini, Viviana Castelli, Romano Camassi (resp. di task), Emanuela Ercolani, Augusto A. Gomez C., Elena Migliorini, Ilaria Leschiutta, Mario Locati, Santi Mirenna, Carmen Mirto, Valentina Montaldo, Giuliana Rubbia R. (resp. di task)	*INGV, Sezione di Milano*
Salvatore Barba, Roberto Basili, Calvino Gasparini, Anna Maria Lombardi	*INGV, Sezione di Roma 1*
Raffaele Azzaro	*INGV, Sezione di Catania*
Barbara Castello, Claudio Chiarabba	*INGV, Centro Nazionale Terremoti*

Sono stati consultati:

Per l'indirizzo delle ricerche:	
Antonio Lucantoni e Fabio Sabetta	*DPC, Servizio Sismico Nazionale*
Per la revisione dei dati di base macrosismici:	
Emanuela Guidoboni, Dante Mariotti, Alberto Comastri	*SGA, Storia Geofisica Ambiente*

Il coordinamento operativo è stato svolto da
Carlo Meletti, Carmen Mirto, Valentina Montaldo e Massimiliano Stucchi

Indice

	Riassunto	**p. i**
1.	**Introduzione**	**p. 1**
2.	**Contesto, obiettivi, aspetti metodologici**	**p. 3**
3.	**Catalogo dei terremoti**	**p. 7**
4.	**Zonazione sismogenetica**	**p. 10**
5.	**Relazioni di attenuazione del moto del suolo**	**p. 18**
6.	**Modalità di parametrizzazione della sismicità**	**p. 25**
7.	**Valutazione di amax (10%/50 anni)**	**p. 49**
8.	**Confronti con altri elaborati**	**p. 59**
9.	**Considerazioni conclusive e ringraziamenti**	**p. 62**
10.	**Riferimenti bibliografici**	**p. 63**

Appendici

App.1 – Catalogo dei terremoti CPTI2	**29 pp.**
App.2 – Zonazione sismogenetica ZS9	**38 pp.**
App.3 – Relazioni di attenuazione del moto del suolo	**22 pp.**
App.4 – Applicazione del metodo a sismicità diffusa	**3 pp.**
App.5 – Diffusione delle informazioni	**6 pp.**
App.A - Elementi del processo di revisione scientifica	**35 pp.**

Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 20 marzo 2003 n.3274, All.1.

Rapporto conclusivo, aprile 2004

Riassunto

Questa iniziativa è stata rivolta a soddisfare l'esigenza di una mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'individuazione delle zone sismiche, formulata dall'Ordinanza PCM 20 marzo 2003 n.3274, All.1, che ne fissa criteri e scadenza (aprile 2004). In particolare, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, raccogliendo l'auspicio della Commissione Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile, ha promosso nel luglio 2003 la redazione della mappa coinvolgendo nella sua redazione esperti del mondo scientifico oltre che propri ricercatori, consegnando una prima versione in tempi molto brevi (novembre 2003). Pur condizionata in modo significativo dalla scadenza, questa ricerca ha utilizzato e elaborato un gran numero di dati e conoscenze prodotti di recente. In particolare:

i) è stata elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9, a partire da un sostanziale ripensamento della precedente zonazione ZS4 (Meletti et al., 2000) alla luce delle evidenze di tettonica attiva e delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite negli ultimi anni. ZS9 è corredata, per ogni ZS, da un meccanismo focale prevalente e da un valore di profondità, determinati nella prospettiva di utilizzo con le relazioni di attenuazione descritte più sotto;
ii) è stata prodotta una versione aggiornata del catalogo CPTI (Gdl CPTI, 1999), detta CPTI2, mediante: i) la revisione dei parametri dei terremoti della zona etnea; ii) la determinazione di valori di Mw e ML per tutti gli eventi; iii) la ricompilazione ex-novo della porzione 1981-1992 e la sua estensione al 2002, utilizzando gli studi macrosismici e strumentali resi disponibili a partire dal 1999;
iii) sono state verificate alla luce dei dati dei terremoti più recenti le relazioni di attenuazione di amax definite a scala nazionale e europea, utilizzando distanze epicentrali calcolate in modo appropriato e le modifiche per i meccanismi focali prevalenti introdotte da Bommer et al. (2003). Inoltre, a partire da leggi di scala ricavate da dati strong- e weak-motion, sono state calibrate tre relazioni di attenuazione regionali, valide per tre macrozone; con approccio analogo è stata sviluppata una nuova relazione utilizzabili per le zone vulcaniche.
iv) sono stati determinati, con approcci storici e statistici, due insiemi di intervalli di completezza dei dati del catalogo CPTI2.

Secondo i criteri in uso nell'ambito scientifico internazionale, le procedure adottate per la compilazione della prima versione della mappa di amax con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Gruppo di Coordinamento, 2003) sono state sottoposte alla revisione di un gruppo di esperti di area europea, che ha fornito valutazioni e suggerimenti in modo sia collegiale che individuale. Conseguentemente, dati di ingresso e procedure sono stati migliorati in accordo con tali indicazioni.
La mappa definitiva, presentata nella pagina successiva e descritta nel seguito, è stata ottenuta come mediana di 16 mappe corrispondenti ad altrettanti rami di un albero logico. Ciascun ramo, cui viene attribuito un peso, esplora alternative riguardanti: i) le modalità di valutazione della completezza del catalogo; ii) le modalità di determinazione dei tassi di sismicità; iii) le relazioni di attenuazione del moto del suolo. La mappa è corredata da una misura dell'incertezza, espressa in termini di distribuzione dei valori dell'84mo percentile relativi al campione delle 16 mappe.

1. Introduzione

L'Ordinanza di Protezione Civile n.3274 del 20 marzo 2003, suppl. n.72 alla GU 8 maggio 2003, n.105, ha dato attuazione ai contenuti del Dls 112/1998, art.93 e 94, che determinano la ripartizione tra Stato e Regioni delle competenze in materia di riduzione del rischio sismico, recependo i risultati del Gruppo di Lavoro istituito dal Sottosegretario alla Presidenza del Consiglio dei Ministri G. Letta, nel dicembre 2002 (decreto 4485 del 4.12.2002).
L'Ordinanza, allineando la normativa per le costruzioni in zona sismica al sistema dei codici europei (EC8), ha consentito una significativa razionalizzazione del processo di individuazione delle "zone sismiche", che nel precedente sistema della "classificazione sismica" non era definito in modo chiaro. L'All.1 dell'Ordinanza stabilisce che le zone sismiche sono individuate da 4 classi di accelerazione massima del suolo (amax) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Stabilisce inoltre che la competenza delle Regioni in materia di individuazione delle zone sismiche si eserciti a partire da un elaborato di riferimento (mappa di amax), da elaborarsi entro un anno (aprile 2004) in modo omogeneo a scala nazionale secondo i criteri previsti dal citato All.1.

Per la fase di prima applicazione, fra le mappe allora disponibili l'Ordinanza adottò come mappa provvisoria di riferimento quella (fig.1a) prodotta nel 1998 (Gruppo di Lavoro, 1999) dal Gruppo di Lavoro istituito dal Servizio Sismico Nazionale (SSN) su indicazione della Commissione Grandi Rischi (CGR) del Dipartimento della Protezione Civile (DPC). Tale mappa, pur essendo: i) concepita con riferimento al precedente sistema della classificazione sismica; ii) basata su dati non del tutto aggiornati; iii) priva delle fasce di tolleranza richieste dall'Ordinanza, suddivideva il territorio in quattro categorie e poteva, in via preliminare, essere interpretata nei termini delle quattro classi di amax definite dal suddetto All.1. La mappa del 1998 è stata adottata con la precauzione di non "declassare" in questa fase i Comuni che risultino ora assegnati a una categoria inferiore a quella in cui erano assegnati in precedenza (fig.1b); la mappa risultante, allegata all'Ordinanza, è presentata in fig.1c.

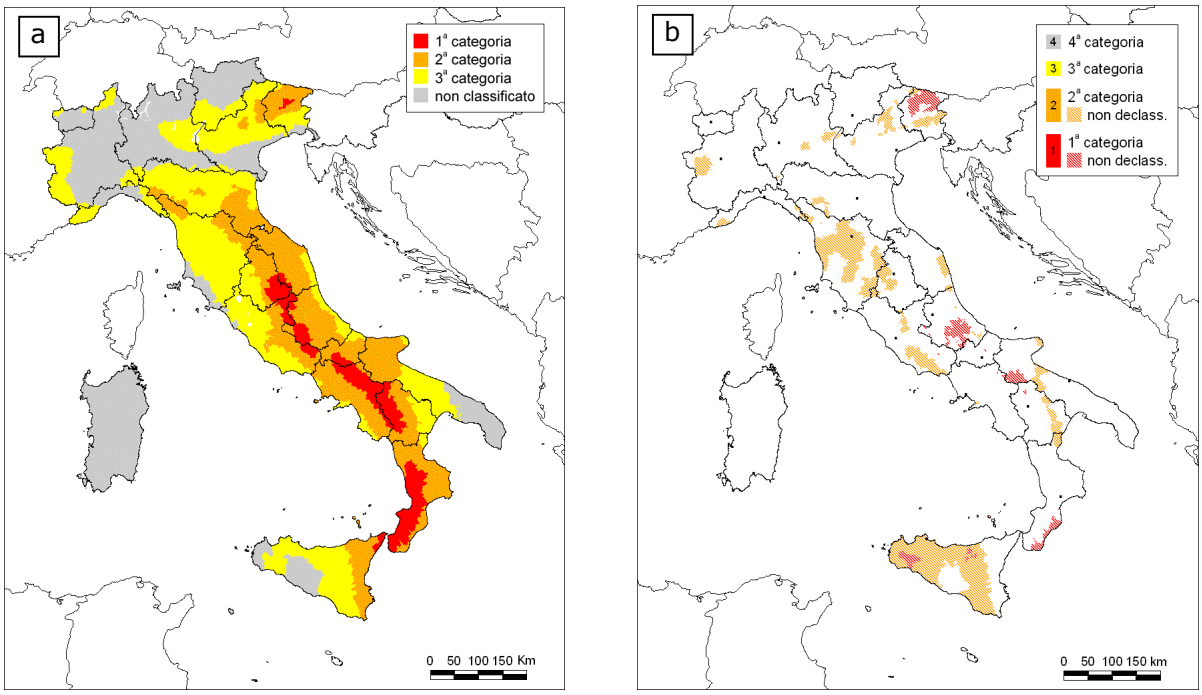


Figura 1. *a)* mappa di classificazione sismica proposta nel 1998 (Gruppo di Lavoro, 1999); *b)* zone non declassificate rispetto alla classificazione in vigore fino al 2003.

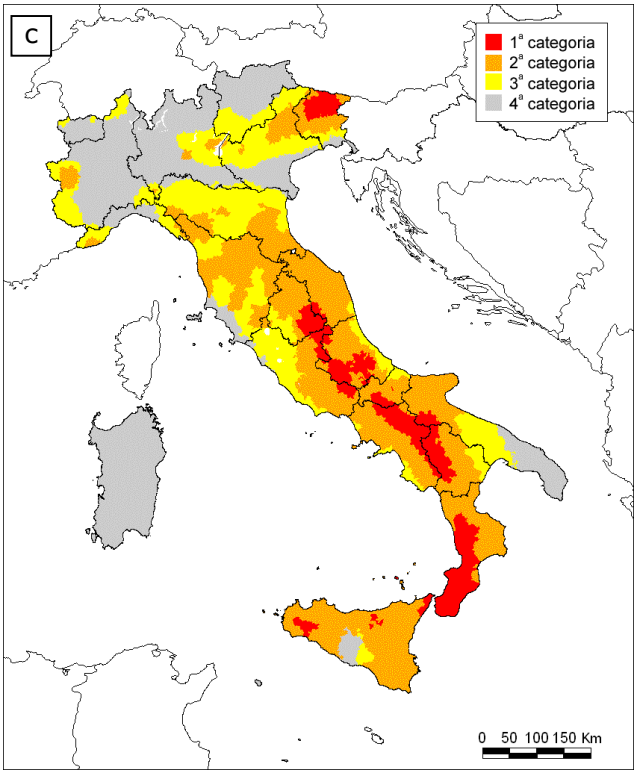


Figura 1c. Mappa delle zone sismiche allegata all'Ordinanza n.3274.

E' bene osservare, comunque, che la coincidenza fra il numero di categorie del precedente sistema ("classificazione sismica") e il numero di zone previste dall'Ordinanza non deve incoraggiare a stabilire un parallelismo stretto fra mappe relative a sistemi che sottendono livelli di protezione sismica differenti. Basti ricordare ad esempio che la quarta categoria precedente non richiedeva alcun intervento antisismico, mentre la quarta zona attuale lo richiede, sia pure in modo semplificato.

Si poneva quindi la necessità di completare la transizione realizzando una mappa finalizzata al nuovo sistema, redatta secondo i criteri fissati dall'All.1 entro la relativa scadenza (aprile 2004). Nel corso della riunione della CGR del 10.06.03 il Presidente dell'INGV annunciava che l'Istituto si era attivato per produrre un documento preliminare entro pochi mesi. Preso atto dell'iniziativa e delle perplessità manifestate da alcune Regioni in ordine a possibili modifiche della mappa di riferimento troppo ravvicinate nel tempo, la CGR esprimeva l'auspicio che i risultati della iniziativa INGV fossero resi disponibili entro il mese di ottobre 2003.

In data 25.06.03 il Presidente dell'INGV formalizzava i caratteri dell'iniziativa al DPC, che a sua volta li recepiva con lettera datata 16.07.03. Il Presidente istituiva quindi un Gruppo di Coordinamento (GdC) che provvedeva alla redazione di un programma di lavoro. Successivamente, recependo le indicazioni della CGR, ribadite dalla citata lettera del DPC, il GdC veniva allargato a esponenti di altri enti di ricerca e dell'università. L'esecuzione della ricerca è stata ripartita nei seguenti sub-obiettivi (task): "zonazione sismogenetica", "catalogo dei terremoti", "relazioni di attenuazione", "calcolo dei tassi di sismicità", "metodi alternativi" e "gestione del sito web". Per ragioni operative il confronto all'interno del GdC è avvenuto prevalentemente per via telematica; si sono comunque effettuate diverse riunioni di singoli task e un incontro collegiale (Milano, 10.10.2003).

Nel novembre 2003 è stato consegnato a DPC il Rapporto Finale (Gruppo di Coordinamento, 2003) contenente la mappa di pericolosità sismica e la descrizione delle procedure impiegate per la sua redazione. DPC ha sottomesso il documento ai componenti della CGR e a un gruppo di revisori di area europea; questi ultimi, dopo averne discusso con alcuni degli autori (1.12.2003), hanno formulato una serie di richieste di miglioramento. Nella stessa data la CGR ha espresso un giudizio sostanzialmente positivo dell'elaborato e ha condiviso le richieste dei revisori.

Si è quindi aperta una seconda fase della ricerca, che è stata svolta essenzialmente da un Gruppo di Lavoro ristretto (GdL), con la collaborazione di alcuni altri ricercatori. Questa fase ha visto uno scambio molto intenso di proposte da parte del GdL e di commenti da parte dei revisori, che ha consentito la verifica di tutti i passaggi della complessa operazione. Il GdL ha dapprima risposto alle richieste dei revisori, quindi ha prodotto alcune ipotesi e alcuni avanzamenti che sono stati discussi in un seminario tenutosi presso la Sezione INGV di Milano (22 e 23 gennaio 2004). A seguito del seminario i revisori hanno formulato nuovi indirizzi, cui il GdL ha risposto con un documento e con il successivo invio di stati di avanzamento su temi diversi. L'insieme dei documenti scambiati fra revisori e gruppo di lavoro è presentato in **App.A**.

Il presente rapporto presenta dunque la versione conclusiva delle ricerche svolte e dei risultati conseguiti. Si tratta di un prodotto di consenso realizzato attraverso numerosi confronti lungo un arco cronologico di circa 4+5 mesi, avvalendosi della tecnologia GIS per visualizzare le proposte di aggiornamento, incrociare i diversi insiemi di dati e verificare in tempi rapidi l'impatto delle diverse scelte sulle stime di pericolosità finali.
E' opportuno sottolineare che, per la prima volta in Italia, un elaborato destinato a sostenere una mappa per l'applicazione della normativa sismica è stato sottoposto a verifica scientifica con i criteri di revisione (*peer review*) in uso presso la comunità scientifica internazionale e con una interazione costante con i revisori stessi.

2. Contesto, obiettivi e aspetti metodologici

Come ricordato più sopra, questa ricerca è stata intrapresa con l'obiettivo principale di fornire in tempi rapidi una mappa pienamente rispondente ai criteri dell'Ordinanza, con particolare riferimento all'impiego di dati aggiornati (All.1,2c) e alla evidenziazione delle fasce di tolleranza (All.1,2d), da mettere a disposizione delle Regioni per le rispettive deliberazioni.

Si è quindi convenuto di adottare metodi consolidati, in gran parte analoghi a quelli utilizzati per la redazione della mappa del 1998 (Gruppo di Lavoro, 1999) scelta come base per la fase di prima applicazione, in modo da apportare al quadro in vigore le variazioni indotte prevalentemente dal notevole aggiornamento delle conoscenze sismologiche (sismicità; potenziale sismogenetico; modalità di propagazione dell'energia, ecc.), piuttosto che dall'adozione di metodologie di calcolo diverse.
Nel seguito vengono descritti gli aspetti principali che hanno caratterizzato la ricerca. Il testo principale presenta tutti gli aspetti in forma sintetica ma esaustiva. Aspetti di dettaglio sono invece trattati nelle Appendici.

Parametri del moto del suolo. I termini del problema sono fissati in modo chiaro dall'All.1 all'Ordinanza. In particolare, l'All.1,2b stabilisce che la mappa vada prodotta "in termini di accelerazione massima (amax) del suolo, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni".

E' stato quindi ritenuto superfluo, in questa fase, fare riferimento ad altri parametri di moto del suolo, utilizzati in altre circostanze in Italia ma non richiesti dall'Ordinanza.
La mappa è stata redatta in termini di valori di amax riferiti a siti su roccia o suolo molto rigido (Categoria A, con Vs>800 m/s, secondo la classificazione introdotta nella stessa Ordinanza, All.2 Norme tecniche, Azione sismica, 3.1).

Si ricorda che le valutazioni che riguardano eventuali amplificazioni del moto del suolo dovute a effetti locali rientrano nelle competenze delle Regioni.

Dati di ingresso. Questa ricerca ha utilizzato tre categorie di elaborazioni: a) risultati consolidati di ricerche pubblicate negli ultimi anni; b) risultati confluiti in questa iniziativa a partire dalle attività svolte nell'ambito di alcuni progetti GNDT in corso di svolgimento ("Terremoti probabili...", coord. A.Amato e G.Selvaggi; "Revisione dei fondamenti....", coord. P.Gasperini; "Sviluppo e confronto di metodologie...", coord. M.Cocco; "Scenari di danno nell'area veneto-friulana", coord. M.Riuscetti); c) elaborati ancora inediti, realizzati *ad hoc* nell'ambito di questa iniziativa.

Nei paragrafi 3, 4 e 5 vengono riassunti gli aspetti principali relativi ai dati di ingresso.

Metodologia. Come detto più sopra, per ragioni di continuità e confronto con precedenti elaborazioni (Slejko et al., 1998; Albarello et al., 2000) sono stati impiegati metodi standard, di uso comune a livello mondiale per valutazioni di pericolosità sismica a scopi di normativa sismica.
In particolare è stato usato l'approccio "Cornell" (Cornell, 1968; Bender e Perkins, 1987), utilizzato dalle citate iniziative italiane, da altre iniziative nazionali in Europa e nel mondo (ad esempio nell'ambito del progetto *"Global Seismic Hazard Assessment Project - GSHAP"*; Giardini, 1999), nonché, a scala europea, nel progetto "*SESAME*" (Jiménez et al., 2001; Giardini et al., 2003).

E' stato previsto l'impiego di un albero logico finalizzato alla esplorazione di incertezze di tipo prevalentemente epistemico riferibili in particolare a:

i) determinazione degli intervalli di completezza del catalogo;
ii) determinazione dei tassi di sismicità;
iii) tipi di relazione di attenuazione del moto del suolo e attribuzione areale delle relazioni a carattere regionale.

I risultati sono stati formulati in termini di mediana ponderata dei predetti rami e relativo 84 percentile.

Approcci "a sismicità diffusa" (es. Frankel, 1995) sono stati utilizzati allo scopo di verificare i risultati ottenuti con i metodi standard. Il carattere convenzionale della mappa richiesta dall'Ordinanza ha portato a escludere l'utilizzo di approcci che considerano modelli non stazionari della sismicità, che pure negli ultimi anni sono stati oggetto anche in Italia di studi e esperimenti particolarmente significativi (Peruzza, 1999; Peruzza e Pace, 2002).

Gli aspetti principali relativi alle procedure adottate sono descritti ai paragrafi 6 e 7; in quest'ultimo vengo presentati i risultati che, al paragrafo 8, vengono confrontati con altre elaborazioni.

Diffusione delle informazioni. Con l'obiettivo di rendere trasparenti le attività connesse a questa iniziativa è stato allestito il sito web http://zonesismiche.mi.ingv.it (fig.2), dedicato a rendere pubblica la documentazione principale, con esclusione dei risultati finali, e a favorire la discussione attraverso un dibattito telematico.

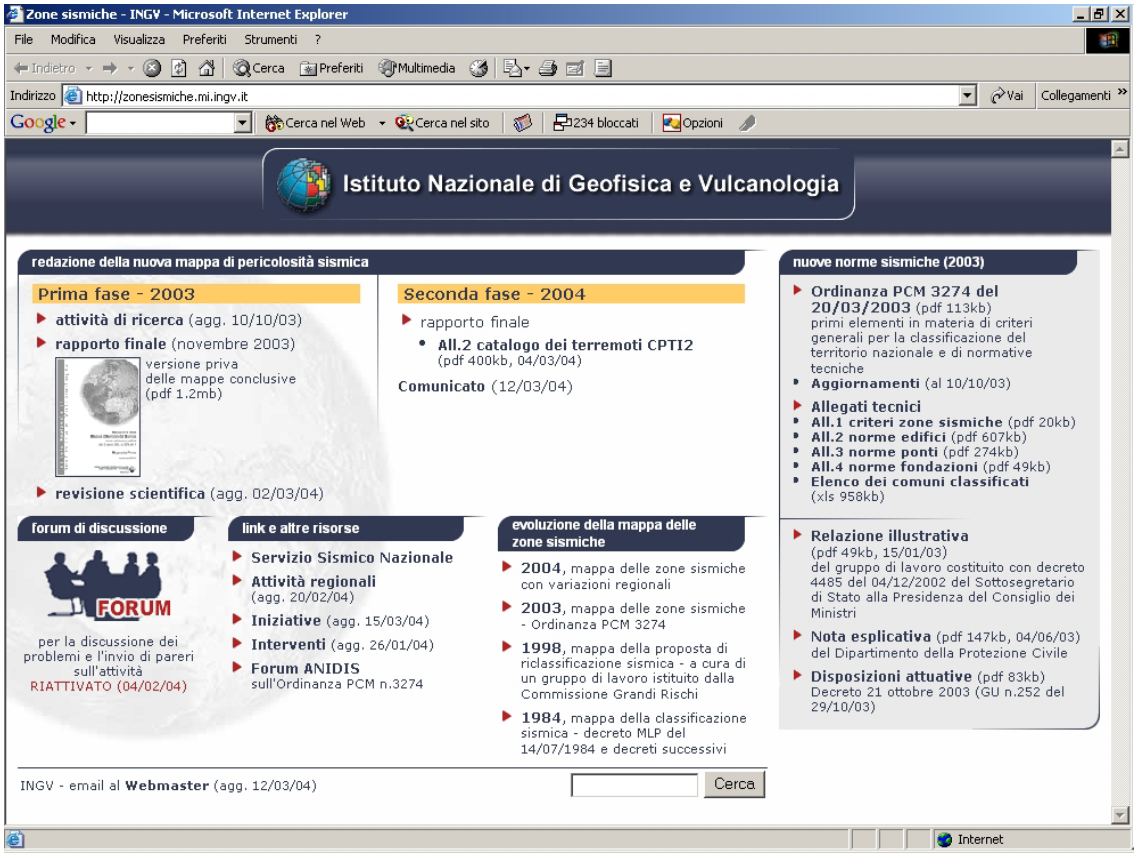


Figura 2. Home page del sito web http://zonesismiche.mi.ingv.it

L'apertura del sito (21 luglio 2003) e l'inserimento degli aggiornamenti principali sono stati pubblicizzati via email ad una rosa di soggetti attentamente studiata; in essa si contano ricercatori e operatori del settore, Università, Centri di ricerca, il Dipartimento della Protezione Civile, i servizi regionali interessati al recepimento della normativa, oltre agli ordini professionali provinciali di ingegneri e architetti, per un totale di circa 1.000 indirizzi di posta elettronica. Alcune Regioni e ordini professionali hanno inserito nei loro siti il link a "zonesismiche.mi.ingv.it" e hanno segnalato al webmaster del sito convegni, workshop e delibere regionali riguardanti l'Ordinanza n.3274.

Il sito ha registrato in media 2500 richieste e 60 visitatori distinti al giorno, raggiungendo, alla metà di marzo 2004, 609.500 richieste e 12.170 visitatori.
Un incremento nelle visite di un ordine di grandezza superiore al valor medio è stato registrato in occasione di un evento sismico di energia medio-bassa (Bolognese, settembre 2003) e in misura maggiore nel periodo successivo alla pubblicazione dei risultati del processo di revisione scientifica (dall'inizio di febbraio 2004).
Le analisi degli accessi hanno messo in luce che il sito è stato consultato con costanza nel periodo luglio 2003 - marzo 2004 (fig.3) in tutte le sue sezioni, da parte sia di contributori sia di utenti dei prodotti finali. Tra i visitatori più assidui si riscontrano le tipologie di utenza destinatarie dell'attività: DPC, INGV e Università, Regioni, Province, Comuni, professionisti, società di consulenza, ecc. (fig.4).

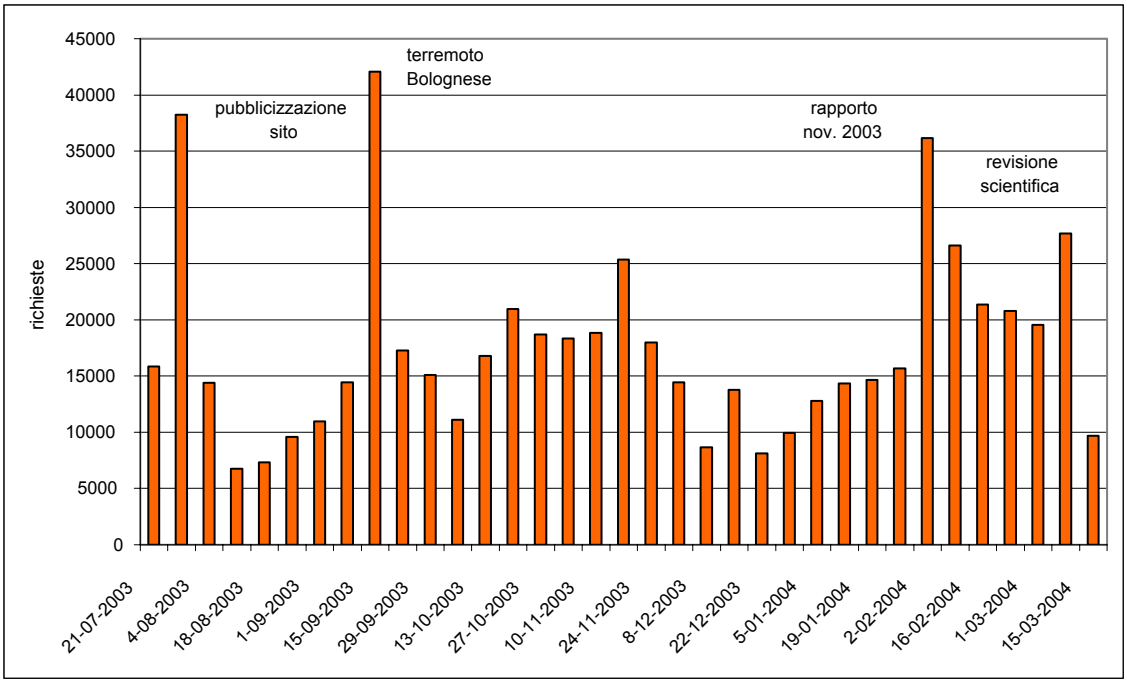


Figura 3. Andamento temporale degli accessi al sito: numero di richieste per settimana (luglio 2003-marzo 2004).

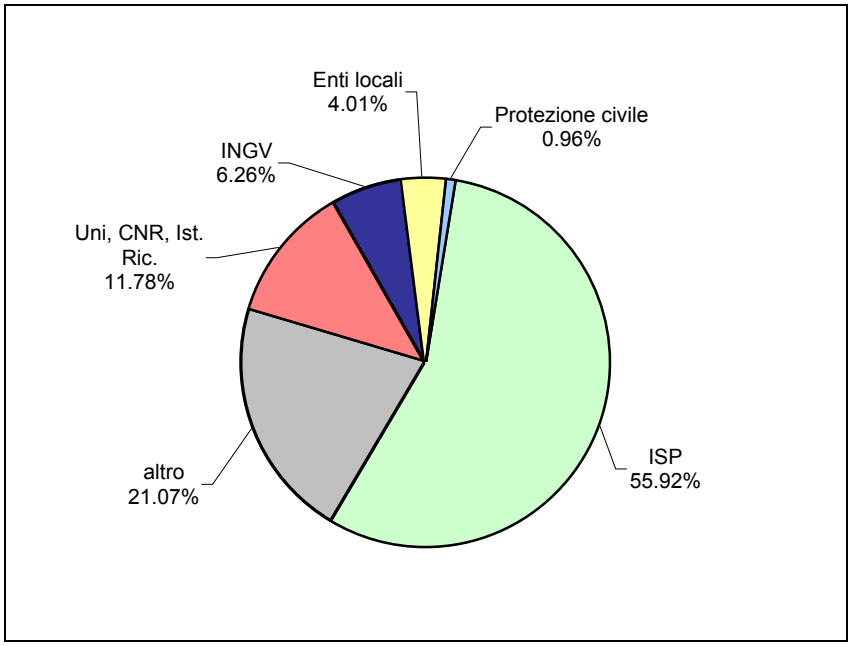


Figura 4. Distribuzione percentuale degli accessi per tipo di utenza (luglio 2003–marzo 2004).

Il forum, dedicato al dibattito esterno al GdC, che in una prima fase di attività non ha riscosso grosso successo di partecipazione, ha aumentato il numero degli accessi dopo la pubblicazione dei primi risultati e dopo la revisione della sua struttura e annessa mailing list, cui sono iscritti circa 100 soggetti con iscrizioni spontanee (ricercatori, ingegneri, regioni) e d'ufficio (board, reviewer, partecipanti al progetto, CGR e singoli).

3. Catalogo dei terremoti

Risultati. E' stata realizzata una versione del catalogo CPTI (Gdl CPTI, 1999), detta CPTI2, aggiornata al 2002, utilizzando tutti gli studi macrosismici e strumentali resi disponibili a partire dal 1999. In particolare: i) è stata ricompilata integralmente la finestra 1981-1992; ii) è stata compilata ex-novo la finestra 1993-2002; iii) sono stati riqualificati tutti i valori di magnitudo a partire dallo studio di Gasperini (**App.1**). In particolare, per tutti gli eventi sono stati determinati i valori di magnitudo omogenei utilizzabili in combinazione con le relazioni di attenuazione di cui al paragrafo 5, e sono stati rivisti i parametri dei terremoti della zona etnea.

Finestra pre-1980. Per ciascun terremoto, a partire dal valor medio di Ms (Ma) fornito da CPTI è stato determinato, utilizzando le relazioni descritte nel seguito e in **App.1,** il valore di Mw, da utilizzare unitamente alle relazioni di attenuazione regionali, e un valore di magnitudo denominato Msp che viene assunto, in accordo con Sabetta e Pugliese (1987), coincidente con Ms per Ms≥5.5 e con ML (ricavata invertendo la relazione empirica tra Ms e ML descritta in **App.1**) al di sotto di tale valore. E' stato verificato che i valori di magnitudo Msp così calcolati sono omogenei a quelli adottati a suo tempo da Sabetta e Pugliese (1987), in quanto la media delle differenze tra le due serie di stime, per i 17 terremoti utilizzati, risulta dell'ordine di 0.01 unità. Per la zona etnea sono state rivalutate le magnitudo macrosismiche ricavate da Io utilizzando le relazioni proposte da Azzaro e Barbano (1997).

Finestra 1981-2002. Per questa finestra, che in CPTI risultava parzialmente lacunosa e comunque limitata al 1992, è stata compilata una versione aggiornata - all'interno della finestra geografica definita per CPTI - sopra la soglia del danno (Io≥5/6, Ms≥4.0) che: i) recepisce i risultati degli studi sismologici, sia macrosismici sia strumentali, realizzati successivamente o comunque non utilizzati per compilare CPTI; ii) offre per ogni terremoto una stima il più possibile omogenea della magnitudo momento Mw, della magnitudo calcolata sulle onde superficiali Ms e della magnitudo locale ML.
Per quanto riguarda i nuovi studi macrosismici consultati si segnalano: a) la versione 3 del Catalogo dei Forti Terremoti Italiani (CFTI3, Boschi et al., 2000); b) il database francese SISFRANCE (SisFrance, 2002); c) il database svizzero ECOS (Swiss Seismological Service, 2002); d) lo studo monografico sulla sismicità di Catania (Boschi e Guidoboni, 2001); e) studi di terremoti realizzati dalla società SGA per INGV relativamente al Molise e all'Italia settentrionale; f) studi di terremoti e rilievi macrosismici di terremoti recenti realizzati da ricercatori INGV.

Per i dati strumentali si è fatto ricorso a diversi set di determinazioni che, sebbene riconducibili essenzialmente al database strumentale INGV, sono il frutto di elaborazioni differenti, per quanto riguarda sia la localizzazione sia la stima della magnitudo. Sono stati considerati in particolare il Bollettino INGV (disponibile in rete dal 1983 fino al 2002), il catalogo CSTI 1981-1996 (Gruppo di Lavoro CSTI, 2001) e due open file risultanti dalle ricerche svolte nell'ambito dei Progetti: i) "Terremoti probabili...", coord. A.Amato e G.Selvaggi; ii) "Revisione dei fondamenti....", coord. P.Gasperini, promossi dal Programma Quadro GNDT 2000-2002. In particolare, per il periodo 1981-1996 è stato usato prevalentemente l'open file fornito dal Progetto "Terremoti probabili...", mentre per il periodo 1997-2002 è stato scelto prioritariamente l'open file del Progetto "Revisione dei fondamenti....". In presenza di dati macrosismici è stata comunque preferita la localizzazione determinata da tali dati.

La distribuzione degli eventi secondo l'origine dei dati di base è presentata in fig.5.

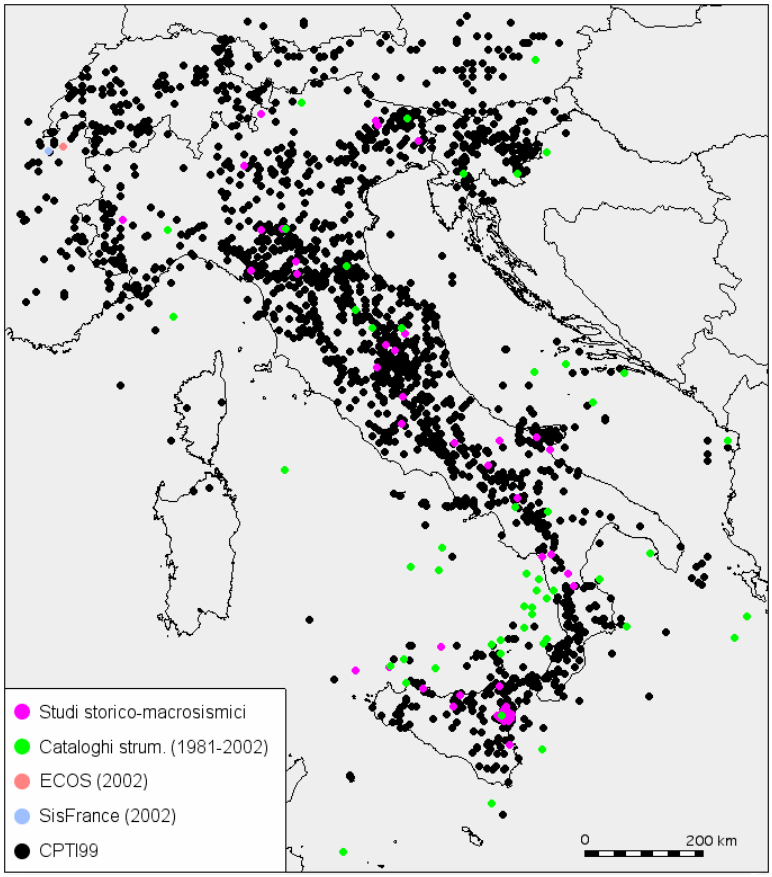


Figura 5. Distribuzione dei terremoti in CPTI2 secondo l'origine dei dati di base.

Determinazione delle magnitudo. Per quanto riguarda le magnitudo, per l'intero periodo 1981-2002 sono state adottate le determinazioni di ML dell'open file del Progetto "Revisione dei fondamenti....". In parallelo è stato predisposto un database di magnitudo strumentali e momenti sismici scalari per l'area italiana, raccogliendo e integrando le informazioni provenienti dalle varie raccolte disponibili: Ambraseys (1990) e Margottini et al. (1993), i cataloghi CMT di Harvard e RCMT dell'INGV (Pondrelli et al., 2002), il catalogo PDE del NEIC e l'open file di determinazioni ML Wood-Anderson e W-A sintetiche risultanti dal lavoro di Gasperini (2002). Questo database ha permesso di stimare nuove relazioni empiriche (figg.6 e 7) tra i vari tipi di magnitudo (Mw, Ms, mb e ML) e quindi di ricavare stime di Mw e Ms e delle relative incertezze per tutti i terremoti aventi almeno un tipo di M.

Sulla base delle associazioni tra dati macrosismici e strumentali sono state in seguito ricavate nuove relazioni empiriche fra dati macrosismici e Mw e Ms; queste relazioni sono poi state utilizzate per calcolare le magnitudo macrosismiche e relative incertezze per tutti gli eventi che disponevano di dati macrosismici. Le magnitudo macrosismiche così ottenute sono poi state combinate, attraverso medie pesate con l'inverso dell'incertezza al quadrato, con le determinazioni strumentali per ottenere il valore finale di Mw; da questa procedura sono state escluse le determinazioni di Mw ottenute dall'inversione del momento tensore, che sono state adottate direttamente.

Infine, per ogni terremoto è stato calcolato - a partire dalla Ms, come per l'intervallo temporale 1000-1980 - il valore di Msp da utilizzare con la relazione di attenuaazione di Sabetta e Pugliese (1987).

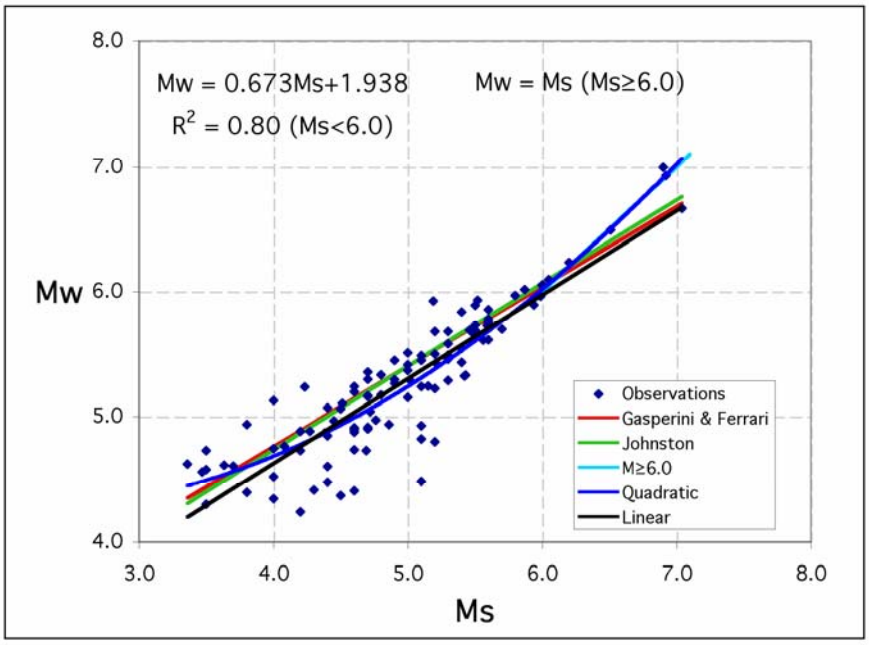


Figura 6. Regressione tra Mw e Ms. In nero la legge empirica utilizzata in CPTI2 per Ms<6. Per confronto sono anche riportate: i) la regressione quadratica (blu); ii) le regressioni lineari ricavate da Johnston (1996) per le regioni continentali stabili (verde) e da Gasperini e Ferrari (2000) per l'Italia (rosso). Per Ms≥6.0 si è assunta la relazione standard Mw=Ms (azzurro).

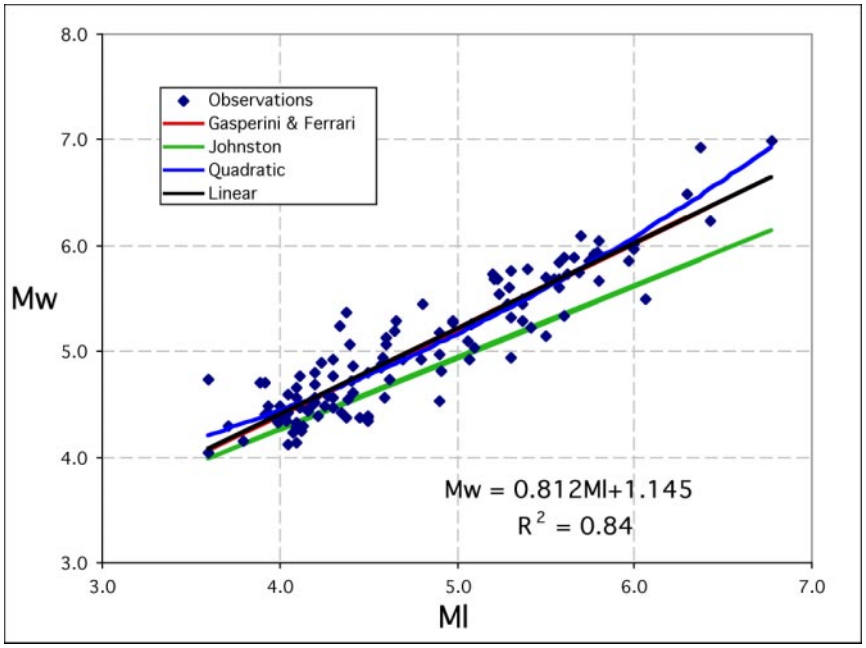


Figura 7. Regressione tra Mw e ML. In nero la legge empirica utilizzata in CPTI2. Per confronto sono anche riportate: i) la regressione quadratica (blu); ii) le regressioni lineari ricavate da Johnston (1996) per le regioni continentali stabili (verde) e da Gasperini e Ferrari (2000) per l'Italia (rosso).

In conclusione si sottolinea che tutti i dati descritti in questa sezione riflettono risultati e avanzamenti nelle conoscenze conseguiti successivamente alla pubblicazione della proposta di riclassificazione del 1998 (Gruppo di Lavoro, 1999) e del catalogo CPTI.

4. Zonazione sismogenetica

Risultati. E' stata sviluppata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9, a partire da un sostanziale ripensamento della precedente zonazione ZS4 (Meletti et al., 2000) alla luce delle evidenze di tettonica attiva e delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite negli ultimi anni. ZS9 è corredata, per ogni zona sismogenetica (ZS), da stima della profondità media dei terremoti determinata nella prospettiva di un suo utilizzo con relazioni di attenuazione regionalizzate, e di un meccanismo di fagliazione prevalente, determinato nella prospettiva di utilizzo delle relazioni di attenuazioni classiche modificate (si veda il paragrafo 5) secondo le procedure di Bommer et al. (2003).
L'ipotesi iniziale di realizzare due zonazioni realmente alternative si è rivelata impercorribile nei tempi a disposizione.

Stato dell'arte. Negli ultimi anni il punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nell'area italiana è stato rappresentato dalla zonazione sismogenetica ZS4 (http://emidius.mi.ingv.it/GNDT/ZONE/zone_sismo.html; Scandone e Stucchi, 2000) proposta da Scandone e colleghi nel 1996 e che rappresentava la traduzione operativa del modello sismotettonico riassunto in Meletti et al. (2000). Di ZS4, adottata anche dai citati progetti GSHAP e SESAME con i necessari adattamenti nelle aree di confine. gli sviluppi più recenti delle conoscenze in materia di sismogenesi hanno evidenziato alcune incoerenze; a queste si sono aggiunte la scarsa compatibilità di ZS4 con il catalogo CPTI e il problema della scarsità del campione di terremoti in molte ZS.

I lavori per sviluppare una nuova zonazione hanno preso l'avvio da alcuni tentativi preliminari proposti da Stucchi et al. (2000, 2002) e hanno poi considerato i molti dati pubblicati dopo l'elaborazione di ZS4 in tema di tettonica attiva e individuazione di sorgenti sismogenetiche. La fonte principale è stata il *Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M5.5 in Italy* (DISS 2.0; Valensise e Pantosti, 2001), i suoi aggiornamenti realizzati nell'ambito del Progetto GNDT "Terremoti probabili...." (coord. A. Amato e G. Selvaggi) e il catalogo CPTI2 descritto al paragrafo precedente.

Sono inoltre stati consultati i contributi di Galadini et al. (2001), i risultati prodotti dal Progetto GNDT "Scenari di danno nell'area veneto-friulana" (coord. M.Riuscetti), importanti studi sismotettonici di settori-chiave della penisola (ad esempio: Azzaro e Barbano, 2000; Boncio et al., 2000; i diversi contributi contenuti in Galadini et al., 2000) nonché proposte metodologiche innovative apparse nella letteratura degli ultimi anni (ad esempio Peruzza, 1999; Lavecchia et al., 2002; Peruzza e Pace, 2002).

Dopo la realizzazione di un prototipo detto ZS7 (fine luglio 2003), privo di stime di profondità, si è preso atto del fatto che non esistevano i presupposti per realizzare due zonazioni realmente alternative; per la versione di novembre si è quindi rilasciata una sola zonazione, definita ZS8.
Successivamente tale zonazione è stata modificata in ZS9 (fig.8); essa va intesa come un prodotto di consenso tra diversi ricercatori attivi in questo settore disciplinare, alcuni dei quali hanno partecipato alla elaborazione delle zonazioni realizzate in ambito ex-GNDT e alla realizzazione di compilazioni e banche dati sulla sismogenesi prodotte da ex-GNDT e INGV.

Approfondimenti sui dati disponibili e sulle scelte operative che hanno portato alla costruzione di ZS9 sono presentati nell'**App.2**.

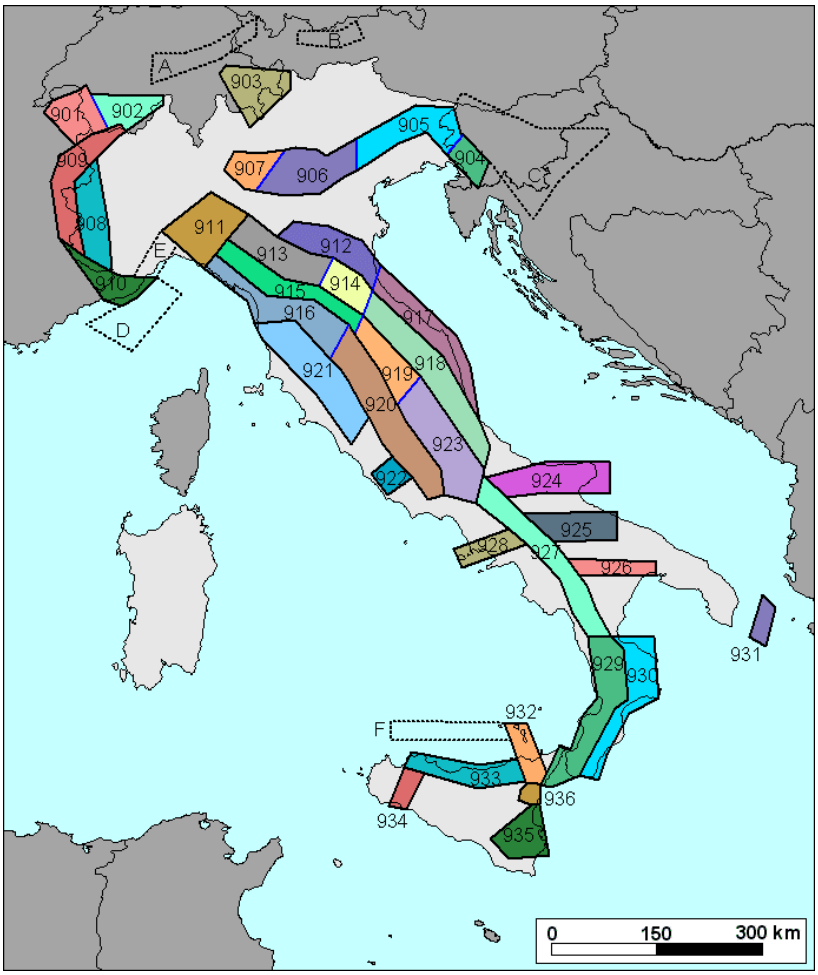


Figura 8. Zonazione sismogenetica ZS9. I limiti di colore blu separano zone con analogo significato cinematico, che differiscono principalmente per le caratteristiche di sismicità. Le ZS con bordo a tratteggio, identificate da una lettera, non sono state utilizzate nella valutazione della pericolosità.

Requisiti principali. ZS9 è stata elaborata in modo da soddisfare i seguenti requisiti:

a) essere coerente in linea di massima con il retroterra informativo di ZS4, che deriva dall'approccio cinematico alla elaborazione del modello sismotettonico;
b) recepire i più recenti avanzamenti delle conoscenze sulla tettonica attiva della penisola e sulla distribuzione delle sorgenti sismogenetiche, avendo come riferimento DISS e i suoi sviluppi a oggi;
c) considerare le indicazioni che derivano dall'analisi dei dati relativi ai terremoti più forti verificatisi successivamente alla predisposizione di ZS4, alcuni dei quali (Bormio 2000, Monferrato 2001, Merano 2001, Palermo 2002, Molise 2002, ecc.) localizzati al di fuori di quelle ZS;
d) avviare a superamento il problema delle ridotte dimensioni delle zone sorgente e della conseguente limitatezza del campione di terremoti di ciascuna di esse;
e) essere coerente con la base di dati utilizzata per compilare il catalogo CPTI2;
f) fornire per ogni ZS una stima di profondità dei terremoti utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale;
g) fornire per ogni ZS un meccanismo di fagliazione prevalente utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione modulate su tale meccanismo mediante i coefficienti proposti da Bommer et al. (2003).

Criteri. Con riferimento ai *requisiti a), b) e c)* gli aspetti innovativi riguardano:

i) il completo riferimento delle ZS dell'Appennino alle direttrici longitudinali;
ii) l'introduzione di ZS Est-Ovest nell'area dell'avampaese apulo, riferite a fasci di lineamenti tettonici attivi dotati di cinematica prevalente trascorrente;
iii) l'introduzione di una fascia di intensa deformazione nel Tirreno meridionale, responsabile di parte della sismicità che interessa la costa tirrenica della Sicilia;
iv) la scelta di privilegiare le proposte del citato progetto SESAME per le zone di confine, previo adattamento alle ZS individuate in Italia;
v) l'assunzione che in tutte le aree che non ricadono in ZS sia comunque possibile il verificarsi di eventi con Mwmax=5.0, derivante dalla constatazione che eventi di energia bassa e intermedia si sono verificati in diverse aree.

In fig.9 ZS9 è posta a confronto con il contenuto informativo di DISS 2.0, aggiornato con i risultati più recenti ottenuti nell'ambito di vari progetti tra cui il già citato progetto GNDT "Terremoti probabili...." (che verranno pubblicati entro la fine del 2004 nel DISS 3.0); in fig.10 con la zonazione del progetto SESAME (Jiménez et al., 2001).

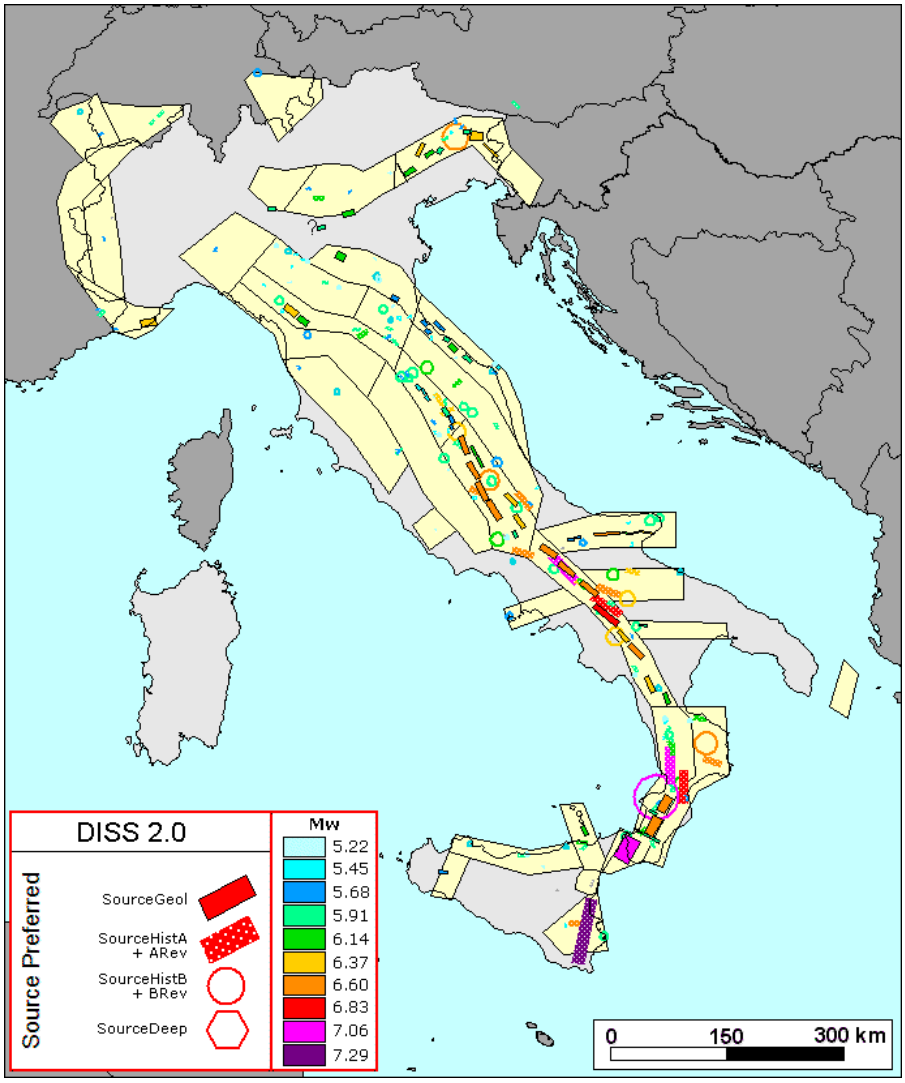


Figura 9. Zonazione sismogenetica ZS9 a confronto con le sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS 2.0 (Valensise e Pantosti, 2001) e relativi aggiornamenti fino al novembre 2003.

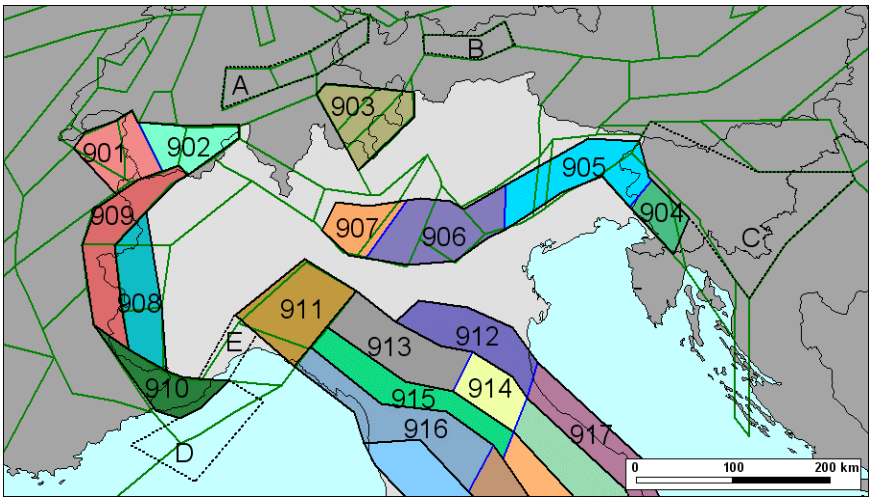


Figura 10. Zonazione sismogenetica ZS9 a confronto con la zonazione del progetto SESAME nell'area alpina (Jiménez et al., 2001; linee di colore verde).

Per quanto riguarda il *requisito d),* occorre osservare che in ZS4 per ben 22 ZS su 80 il numero di terremoti che ricadevano in ciascuna ZS era pari o inferiore a 10 eventi; in seguito all'applicazione degli intervalli di completezza del catalogo adottati da Slejko et al. (1998), il numero di ZS con questa caratteristica saliva a 39.
Per risolvere questo problema, per il disegno di ZS9 si è proceduto all'individuazione di fasce geografiche a comportamento cinematico omogeneo e sono state definite ZS abbastanza estese (fig.11), che in alcuni casi rappresentano semplicemente un accorpamento di zone contigue di ZS4.

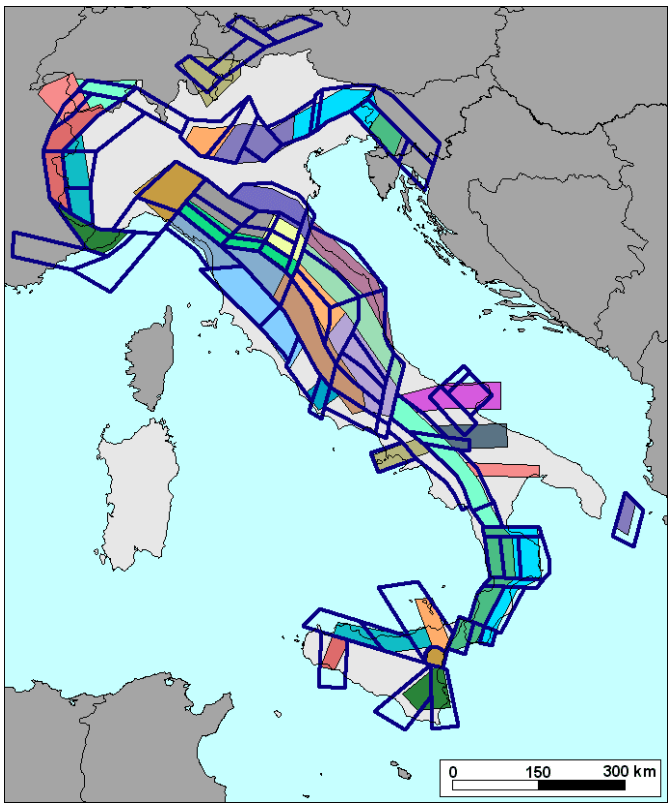


Figura 11. Zonazione sismogenetica ZS9 (linee sottili di colore nero) a confronto con ZS4 (linee di colore blu scuro).

In totale le zone sismogenetiche di ZS9 sono 36, cui vanno aggiunte 6 zone (fig.8) non utilizzate in quanto:

a) quattro non contribuiscono in modo significativo alla pericolosità del territorio italiano: Svizzera centrale (A), Tirolo (B), Slovenia centrale (C), Mar Ligure (D);
b) il numero di eventi che ricade all'interno di una di esse, Genova-Savona (E), è molto basso;
c) per una di esse, denominata Ustica-Alicudi (F), è stata adottata quale alternativa conservativa la ZS 933, Sicilia Settentrionale.

Per la ZS 931, Canale d'Otranto, che rientrerebbe nel caso b), è stata fatta un'eccezione al fine di non sottovalutare la pericolosità sismica indotta nel Salento dai terremoti localizzati nel Canale stesso.

Per quanto riguarda la Sicilia settentrionale, per la quale i revisori hanno esplicitamente richiesto particolare attenzione, i dati recenti di sismicità strumentale hanno messo in evidenza una sismicità legata alla zona di deformazione che dalle Eolie (Ovest di Alicudi) si estende fino a Ustica, con orientamento E-W (fig.12). A questa zona è da ricondurre il recente terremoto del settembre 2002 che ha provocato danni a Palermo, e probabilmente alcuni forti terremoti storici (es.: 1726, 1823, 1940). Una trattazione dettagliata del problema è presentata in **App.2**; in particolare, se è vero che dall'esperienza del terremoto del 2002 (Mw5.9; Mw da dati macrosismici 5.1) si deduce che le magnitudo dei terremoti citati potrebbe essere fortemente sottostimata, è altrettanto vero che la loro localizzazione fornita da CPTI2 in terra compensa, in modo conservativo, tale possibile sottostima.

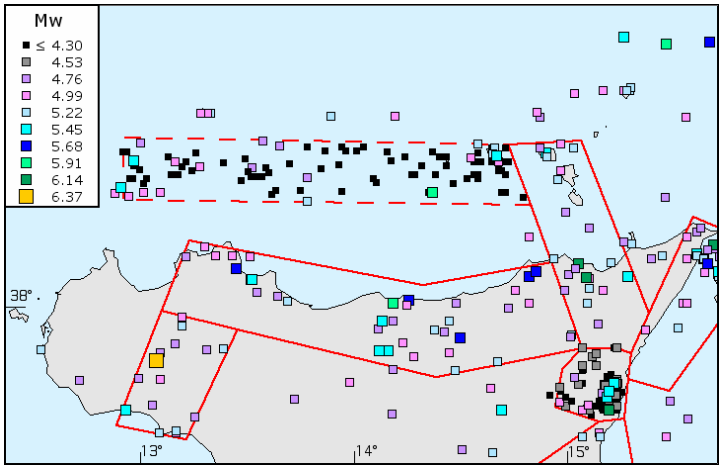


Figura 12. Sismicità recente nella zona Ustica-Alicudi e sismicità 1000-2002 in tutta l'area.

In definitiva si ritiene dunque che la ZS 933, che contiene di fatto tanto la sismicità realmente originatasi in terraferma (es. i terremoti delle Madonie del 1818-1819) che l'immagine della sismicità probabilmente generata *offshore*, sia da considerarsi la soluzione oggi più coerente con lo stato delle conoscenze e con la scarsa definizione del potenziale sismogenetico della zona di deformazione in mare.

In totale, la superficie coperta dalle zone sismogenetiche in ZS9 è di 191.000 kmq (226.000 kmq considerando anche le 6 zone non utilizzate), contro i 250.000 kmq di ZS4. La superficie media di ciascuna ZS è di 5.300 kmq circa (3.100 kmq in ZS4). Il numero medio di terremoti per ZS è 42; solo 2 ZS su 36 hanno meno di 10 eventi.

Profondità. Per quanto riguarda il *requisito f),* in assenza di letteratura specifica e nella prospettiva di utilizzo già ricordata si è convenuto di individuare per ogni ZS una profondità "efficace", definita come l'intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti, ovvero l'intervallo nel quale si colloca presumibilmente lo strato sismogenetico che rilascerà i prossimi eventi. Tale valore è stato determinato attraverso una stima statistica delle profondità a cui si sono verificati gli eventi sismici del recente passato, utilizzando il catalogo della sismicità strumentale (1983-2002) dell'INGV (disponibile in rete sul sito INGV: ftp.ingv.it/bollet).

Lo strato sismogenetico è stato definito come quell'intervallo di profondità che ha generato il 90% degli eventi che ricadono all'interno di ogni zona. I limiti superiore e inferiore dello strato sismogenetico sono stati quindi individuati alle profondità che includono un numero di eventi cumulato pari rispettivamente al 5% e al 95% del totale. La profondità efficace è stata identificata con la profondità corrispondente alla moda principale della distribuzione di frequenza degli eventi. Per ragioni operative è stato adottato un numero limitato di classi (fig.13). Ulteriori dettagli su come sono state ottenute le profondità sono forniti nell'**App.2**.

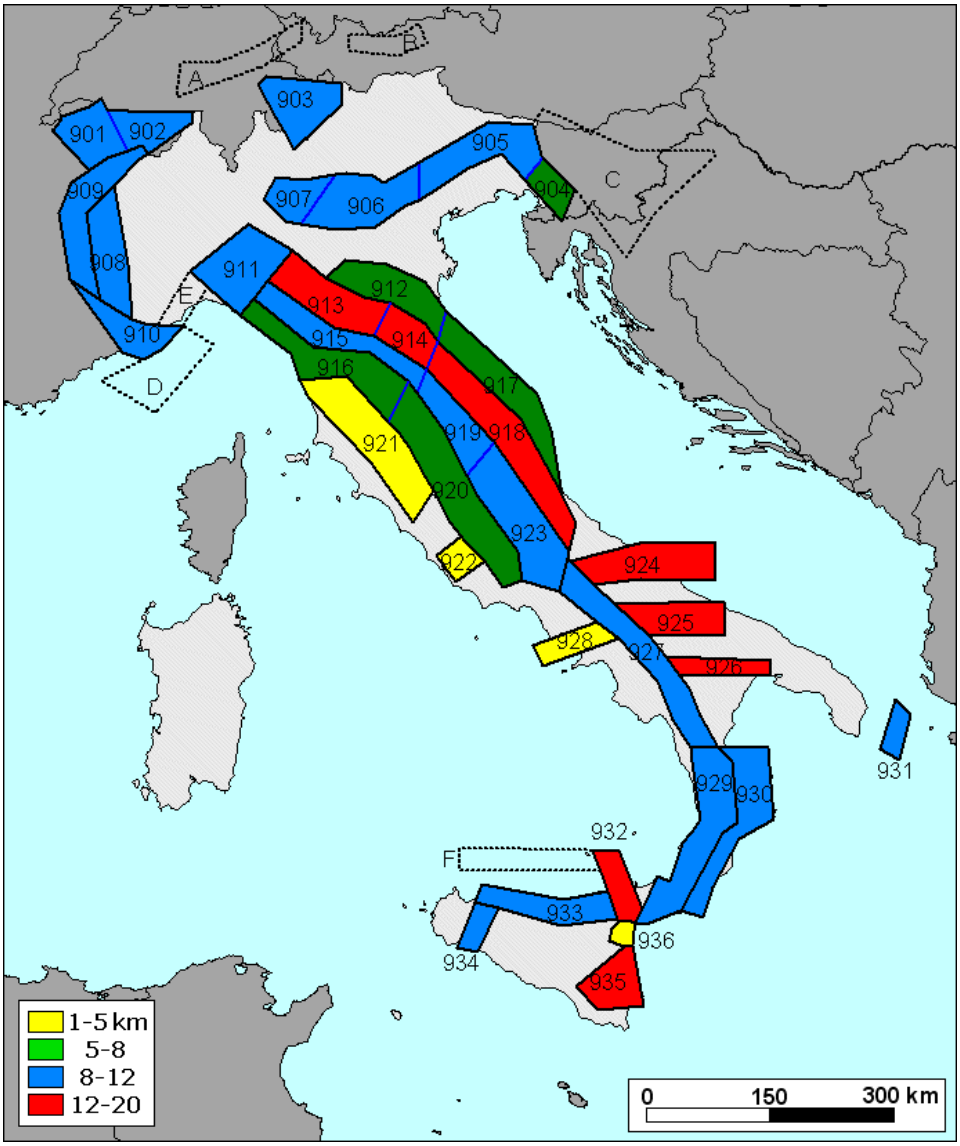


Figura 13. Attribuzione della classe di profondità alle ZS di ZS9.

Meccanismo di fagliazione prevalente. Per quanto riguarda il *requisito g),* al fine di utilizzare le modifiche alle relazioni di attenuazione proposte da Bommer et al. (2003) è stato determinato il meccanismo di fagliazione prevalente per ogni zona di ZS9. Per meccanismo prevalente si intende quello che ha la massima probabilità di caratterizzare i futuri terremoti significativi. Concordemente alla classificazione utilizzata da Sadigh et al. (1997) tale meccanismo è stato espresso secondo tre tipologie: "normale", "inverso", "trascorrente (destro e sinistro)", a cui è stata aggiunta la tipologia "non determinato" per i casi in cui l'insieme dei dati non è risultato sufficiente per una determinazione univoca.
L'assegnazione della tipologia in funzione dell'angolo di *rake* è stata effettuata sulla base del seguente semplice criterio:

Meccanismo prevalente		**Angolo di *rake***
Normale		>225 (-135), <315 (-45)
Inverso		>45, <135
Trascorrente	sinistro	<45, >315 (-45)
	destro	>135, <225 (-135)

La fig.14 mostra il meccanismo di fagliazione prevalente stimato a partire da:

1) meccanismi focali di terremoti strumentali significativi, tratti da un ampio database nazionale recentemente pubblicato (Vannucci e Gasperini, 2003);
2) dati geologici a varie scale, incluse misure di *stress in situ* (Montone et al., 1999), dati di sottosuolo e stime sulla cinematica delle principali faglie attive (database DISS 2.0: Valensise e Pantosti, 2001).

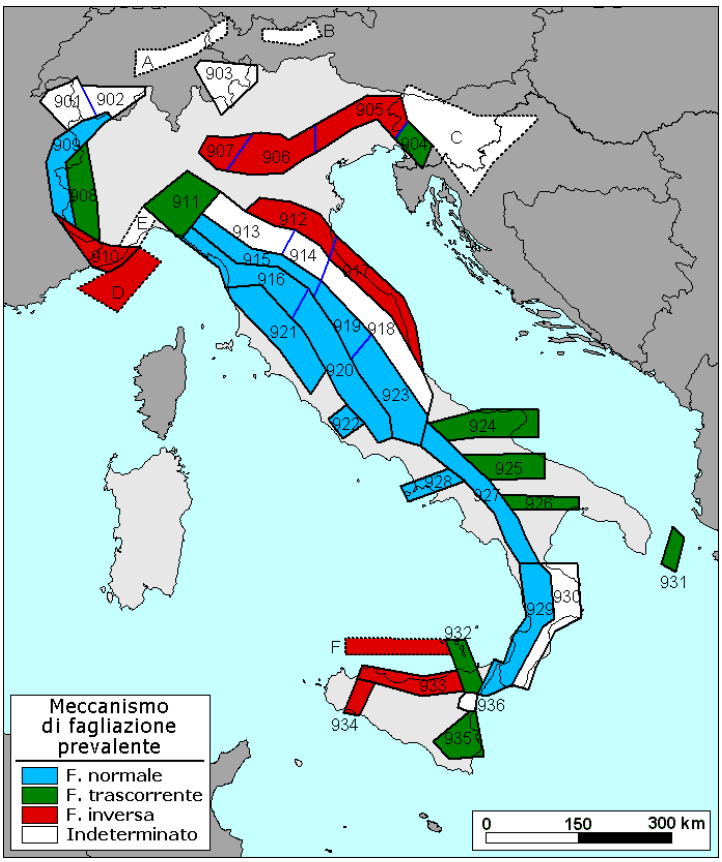


Figura 14 – Meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse ZS.

Attendibilità delle geometrie delle ZS. Com'è ovvio, i confini geografici di molte ZS rappresentano il frutto di un compromesso tra numerosi parametri, compromesso necessariamente basato su decisioni di tipo esperto e affetto da un certo margine di incertezza. Nella prospettiva della valutazione della pericolosità sismica, le incertezze in ZS9 sono state gestite, con criteri conservativi, con riferimento a due aspetti:

a) *associazione dei terremoti alle ZS (requisito e).* È interessante sottolineare che, nonostante sia disponibile dal 1999, il catalogo CPTI non è stato usato per valutazioni di pericolosità sismica basate su ZS4. Questa circostanza è probabilmente dovuta al fatto che CPTI derivava da una base di dati diversa e migliore rispetto a quella disponibile all'epoca della prima elaborazione di ZS4, ed era quindi incompatibile con questa zonazione. In questa ricerca si è provveduto a rendere CPTI2 utilizzabile in combinazione con ZS9, forzando in modo critico l'associazione di alcuni terremoti a una ZS oppure al background. Oltre ai terremoti localizzati nelle ZS, a esse sono stati associati – con criterio conservativo - 99 eventi localizzati nel background, dopo un esame delle incertezze delle rispettive localizzazioni. Con criteri analoghi altri 18 eventi sono stati associati a ZS diverse da quelle in cui ricade l'epicentro (fig.15a).

b) *utilizzo di "bordi morbidi"*. Per tener conto delle incertezze nella definizione dei limiti delle ZS si è fatto ricorso alla tecnica dei "soft boundaries", che consente di rendendo progressivo, ai fini della valutazione della pericolosità sismica, il passaggio da una ZS all'altra e da una ZS alle aree di background. In questa elaborazione sono stati utilizzati "bordi morbidi" di dimensioni variabili in quasi tutte le ZS, ad eccezione di quelle della catena appenninica che risultano ben vincolate dalle sorgenti sismogenetiche. Le dimensioni dei bordi morbidi (fig.15b) sono state determinate in relazione alle incertezze nei confini delle ZS cui si riferiscono; in parte sono proporzionali alle dimensioni minori delle stesse.

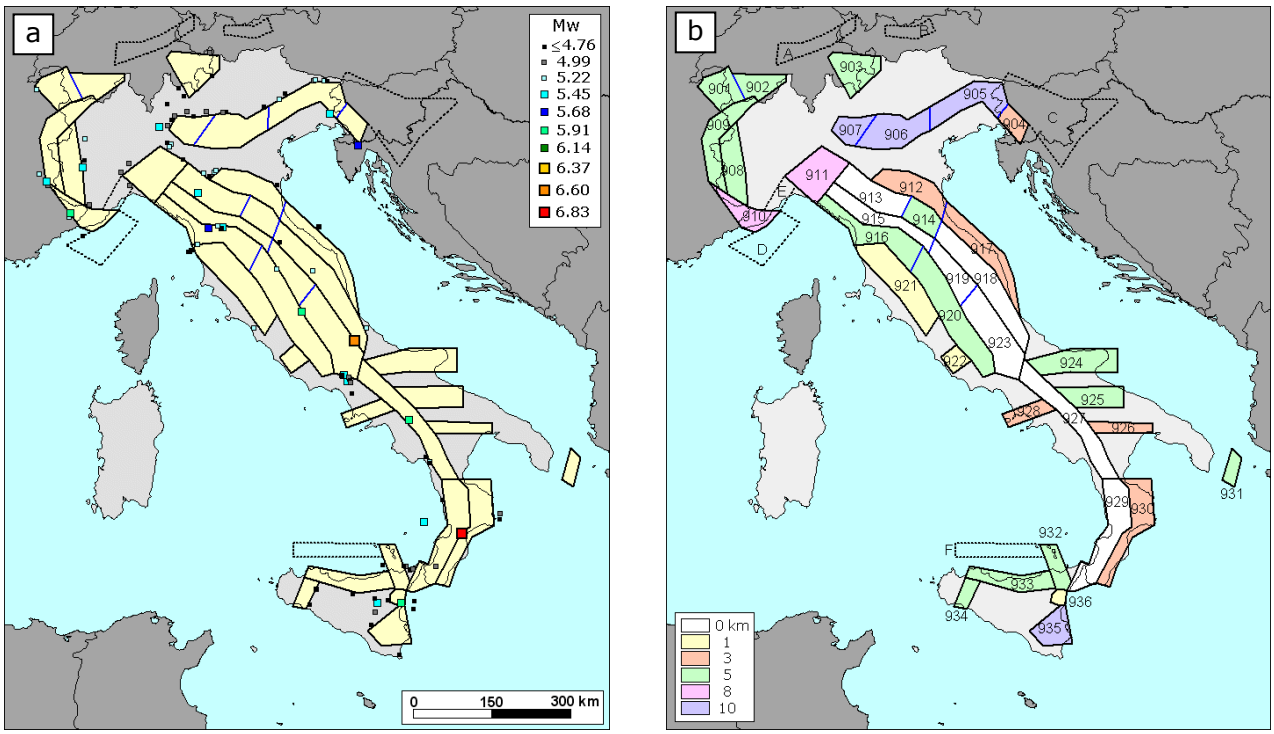


Figura 15. a) Eventi del catalogo assegnati ad una ZS diversa da quella di pertinenza geografica. b) Zone nelle quali sono stati utilizzati i bordi morbidi, e relative dimensioni.

5. Relazioni di attenuazione del moto del suolo

Risultati. Le relazioni di attenuazione di amax definite a scala nazionale e europea sono state verificate alla luce dei dati dei terremoti più recenti. La relazione di Ambraseys et al. (1996) è stata riconsiderata in modo da poter utilizzare correttamente distanze epicentrali. Per questa relazione e per quella di Sabetta e Pugliese (1996) sono stati utilizzati i fattori correttivi per il meccanismo focale prevalente, proposti da Bommer et al. (2003). Inoltre, a partire da leggi di scala ricavate da dati strong- e weak-motion, sono state calibrate relazioni di attenuazione regionali per tre macrozone. Con approccio simile sono state sviluppate relazioni per le zone vulcaniche.

Verifica e aggiornamento delle relazioni di attenuazione di amax definite a scala nazionale e europea. Le principali relazioni di attenuazione determinate a scala europea, quali quelle di Ambraseys (1995) e di Ambraseys et al. (1996), e a scala nazionale, quelle di Sabetta e Pugliese (1996) e di Tento et al. (1992), sono tutte derivate dall'analisi statistica di insiemi simili di dati accelerometrici.
La relazione di Ambraseys (1995), usata per valutare la pericolosità sismica da Slejko et al. (1998), è definita per un suolo generico ed è stata superata dalla relazione di Ambraseys et al. (1996), di qui in avanti ASB96, ricavata da alcune centinaia di registrazioni strong-motion europee di terremoti con Ms compresa tra 4.0 e 7.6.

La relazione ASB96 non usa una definizione univoca di distanza; infatti adotta la distanza dalla proiezione in superficie della faglia (secondo la definizione di Joyner-Boore, 1981) per eventi di Ms≥6.0, e la distanza epicentrale per i terremoti più deboli. Nell'uso corrente delle analisi probabilistiche di pericolosità la distanza viene calcolata suddividendo le aree sorgente in celle e considerando la distanza geometrica tra il baricentro di ciascuna cella, considerata sede di un terremoto, e i nodi di una griglia di punti/siti. Questa misura non corrisponde esattamente né alla distanza dalla faglia, né a quella epicentrale, anche se quest'ultima sembra fornire la migliore approssimazione. Nonostante ASB96 sia stata usata all'interno di tutti i principali progetti di calcolo della pericolosità (Slejko et al. 1998; Giardini, 1999; Slejko et al., 1999; Albarello et al., 2000; Jiménez et al., 2001), non risulta che il problema di utilizzare distanze coerenti con quelle che hanno concorso a definire la relazione sia mai stato affrontato in pratica. Data la necessità di operare in tempi rapidi, sono state valutate alcune possibilità di conversione basate sui dati disponibili, rinviando la verifica della qualità delle informazioni e l'esplorazione della possibilità di usare dati più aggiornati. Dal confronto dei risultati ottenuti da vari test, la scelta migliore è sembrata quella di introdurre una relazione di conversione tra distanza dalla faglia (R_{JB}) e distanza epicentrale (R_{EPI}) calcolata a partire dal database europeo pubblicato da Ambraseys e Bommer (1991), e cioè l'equazione (fig.16):

$$R_{JB} = -3.5525 + 0.8845 \cdot R_{EPI} \qquad \left(R^2 = 0.95\right)$$

La correzione per la distanza è stata applicata alla relazione ASB96 esclusivamente per Ms≥6.0. In fig.17 sono mostrati i risultati: le curve nere a tratto continuo rappresentano le curve di attenuazione corrette, per Ms comprese tra 4.0 e 7.5; quelle blu tratteggiate sono le curve usate in precedenza (solo per Ms≥6.0).

La relazione di Sabetta e Pugliese (1996; di seguito SP96), basata su dati esclusivamente italiani, adotta Ms come magnitudo di riferimento per terremoti con M>5.5 e ML per terremoti con M<5.5; è stata usata da Romeo e Pugliese (1998 e 2000) e da Albarello et al. (2000) per produrre mappe di pericolosità nazionali.

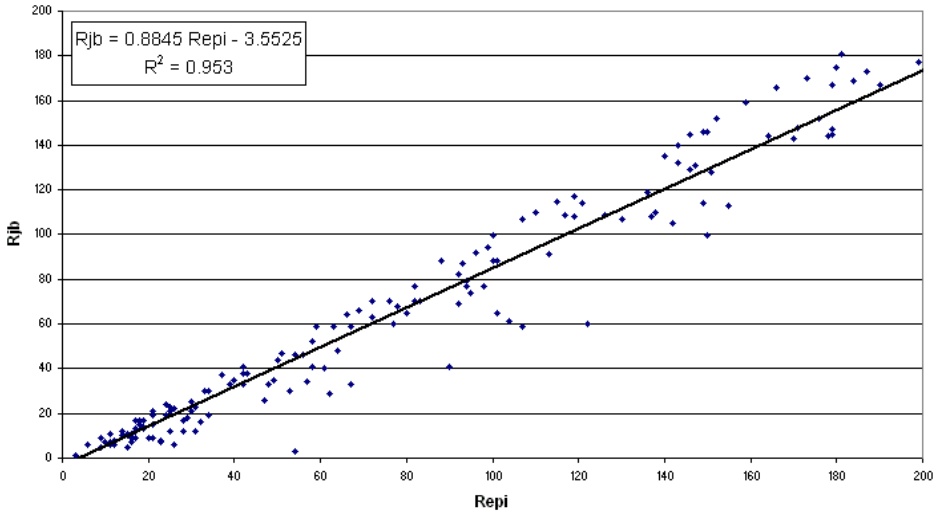


Figura 16. Interpolazione dei dati di Ambraseys and Bommer (1991).

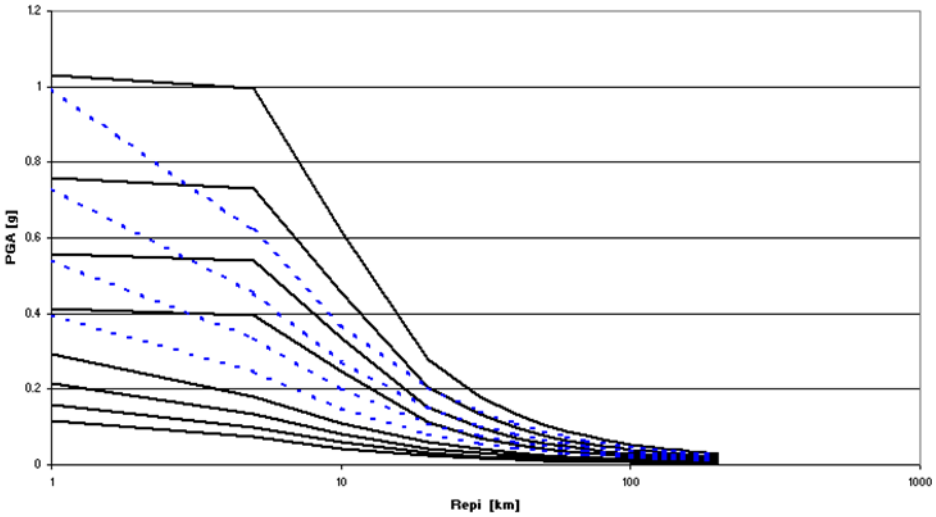


Figura 17. Curve di attenuazione ASB96 corrette per le distanze: in nero le curve corrette (Ms comprese tra 4.0 e 7.5), in blu a tratteggio le curve non modificate (solo per Ms≥6.0).

Pur derivando da insiemi di dati non omogenei dal punto di vista sismotettonico, le relazioni di attenuazione citate possono essere modulate per tenere conto del meccanismo di faglia seguendo la procedura proposta da Bommer et al. (2003). Il metodo si basa sull'utilizzo di fattori correttivi che esprimono il rapporto tra lo scuotimento dovuto a faglie inverse e faglie normali rispetto allo scuotimento dovuto a faglie trascorrenti (rispettivamente $F_{R:SS}$ e $F_{N:SS}$). Questi fattori, usati in combinazione con un criterio di classificazione dei meccanismi di faglia simile a quello proposto da Sadigh et al. (1997), consentono di sostituire tre distribuzioni lognormali specifiche per tipo di faglia – normale (N), inverso (R) o trascorrente (SS) - alla distribuzione lognormale che corrisponde alla relazione di attenuazione "media" (es. ASB96, SP96, etc.).

Il contributo delle tre distribuzioni rispetto a quella "media" è definito in base al numero di terremoti che, nel database usato per derivare le relazioni di attenuazione, risultano classificati all'interno delle tre categorie (Bommer et al., 2003). Lo scarto quadratico medio delle relazioni di attenuazione modulate può essere assunto, in modo cautelativo, uguale a quello della relazione media (Bommer et al., 2003).
Il metodo di Bommer et al. (2003) è stato applicato alle relazioni ASB96 e SP96. Le figg.18 e 19 mostrano rispettivamente le curve di attenuazione ASB96 (con le distanze corrette come illustrato in precedenza) e SP96, modulate in funzione del meccanismo di faglia; i valori dei coefficienti correttivi sono riportati in tab.1.

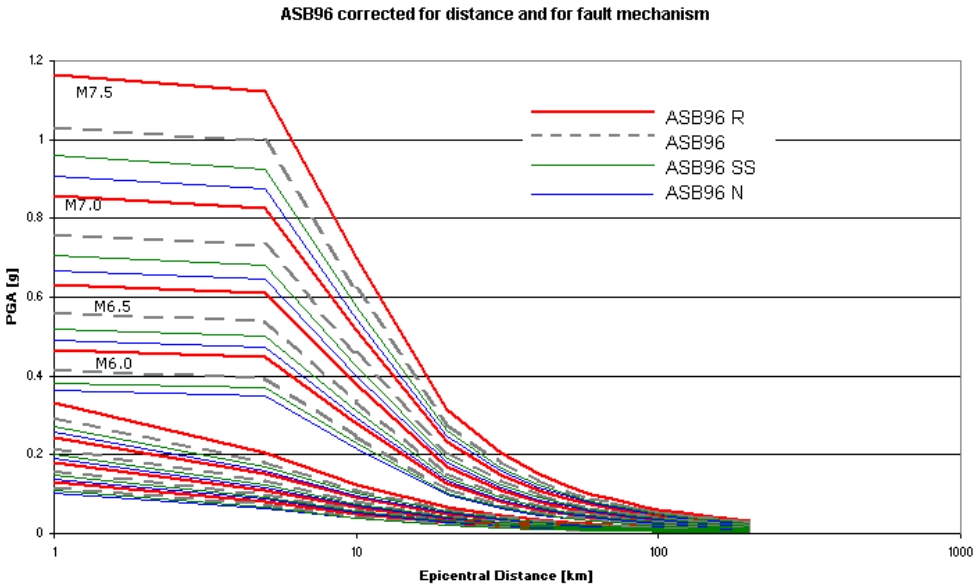


Figura 18. Curve di attenuazione ASB96 modulate in funzione del meccanismo di faglia. La curva a tratteggio è quella media; in rosso la correzione per faglie inverse, in verde per faglie trascorrenti, in blu per faglie normali.

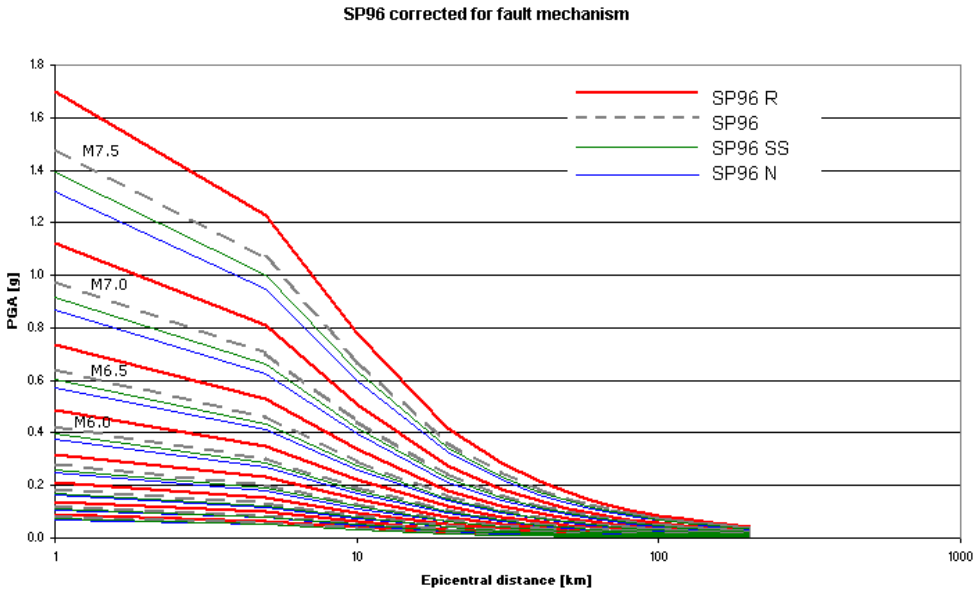


Figura 19. Curve di attenuazione SP96 modulate in funzione del meccanismo di faglia. La curva a tratteggio è quella media; in rosso la correzione per faglie inverse, in verde per faglie trascorrenti, in blu per faglie normali.

Attenuazione	$F_{R:EQ}$	$F_{N:EQ}$	$F_{SS:EQ}$
ASB96	1.13	0.88	0.93
SP96	1.15	0.89	0.94

Tabella 1. Coefficienti correttivi per meccanismo di faglia da applicare alle relazioni di attenuazione ASB96 e SP96.

Allo scopo di verificare la capacità predittiva delle relazioni ASB96 (corretta per distanze epicentrali) e SP96, sono stati eseguiti confronti con i dati di registrazioni di terremoti italiani recenti, in particolare del terremoto di Colfiorito del 26 settembre 1997 (evento delle 09:40, Mw6.0, Ms6.0) e del terremoto del Molise del 31 ottobre 2002 (Mw5.8, Ms5.6), ottenendo un accordo accettabile (fig.20). Entrambe le relazioni sono presentate nella versione modulata per faglia normale nel caso di Colfiorito (fig.20a) e trascorrente per il terremoto del Molise (fig.20b).

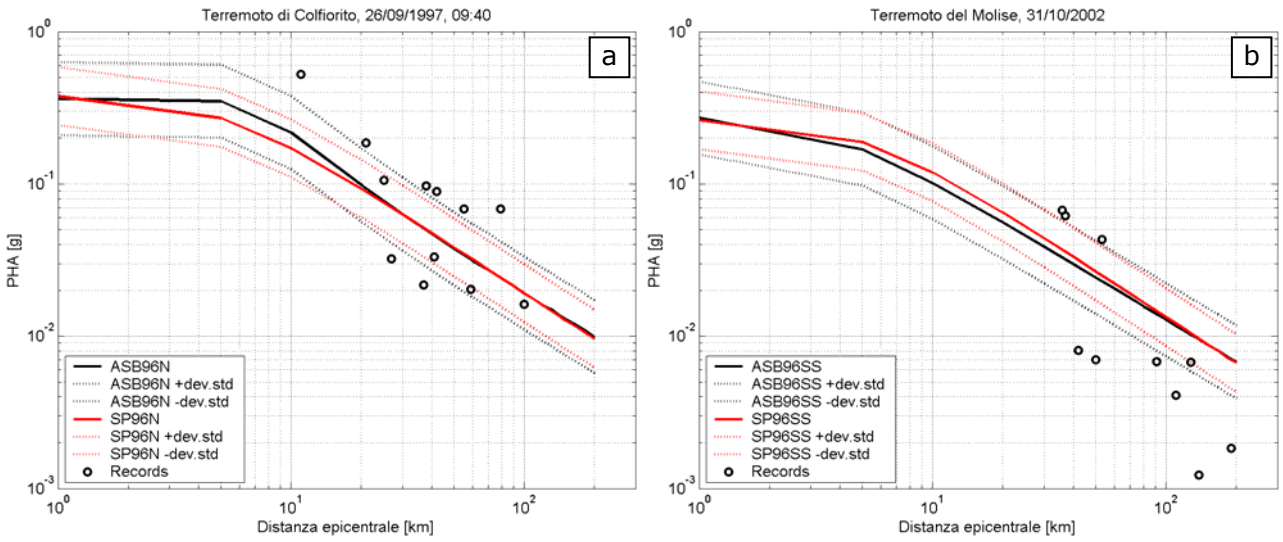


Figura 20. *a)* Confronto tra le curve ASB96 per faglie normali (ASB96N, in nero) e SP96 per faglie normali (SP96N, in rosso) per Ms6.0 con i dati del terremoto di Colfiorito (Ms6.0). *b)* confronto delle stesse relazioni modulate per faglie trascorrenti (ASB96SS, in nero, e SP96SS in rosso) per Ms5.5 con i dati del terremoto del Molise (Ms5.6).

Definizione di relazioni di attenuazione regionali. Uno dei limiti di cui soffrono le relazioni di attenuazione formulate in termini di amax è dovuto al ristretto campione di dati in base al quale vengono determinate. Questo problema viene parzialmente ovviato facendo ricorso a dati di regioni molto ampie (Italia o addirittura Europa); a fronte di risultati statisticamente più stabili, tuttavia, le relazioni così ottenute tendono a descrivere un comportamento "medio" che in molti casi è poco rappresentativo di situazioni regionali e locali. Un esempio notevole è costituito dalle zone vulcaniche.

Per superare questo limite si è verificata la possibilità di utilizzare leggi di scala determinate su base regionale a partire da registrazioni strong- e weak-motion, che forniscono ovviamente un campione di dati più consistente.

In particolare, le leggi di scala regionalizzate proposte da Malagnini et al. (2000 e 2002) e da Morasca et al. (2003) contengono informazioni sulla propagazione rispettivamente per tre macrozone: Italia occidentale/Alpi occidentali (zona 1); Italia orientale/Alpi orientali (zona 2); Appennino centro-settentrionale (zona 3). Il passaggio dalle leggi di scala regionalizzate a relazioni di attenuazione regionalizzate è stato effettuato utilizzando la teoria delle vibrazioni aleatorie (RVT, Cartwright and Lounguet-Higgins, 1956); in questo modo è possibile ottenere stime teoriche di amax in funzione della magnitudo e della distanza ipocentrale. Poiché le relazioni regionali non sono definite per distanze ipocentrali inferiori a 10 km, si è convenuto di vincolare il valore di amax a 1 km di distanza epicentrale a quello fornito dalla relazione di Ambraseys et al. (1996), modificata per la distanza ma non per i meccanismi focali. Alle relazioni di attenuazione così ottenute, definite in termini di Mw e rappresentate in fig.21a per Mw6.0, sono stati assegnati valori dello scarto quadratico medio del logaritmo di amax valutati tramite stime indirette, che per le tre macrozone risultano nell'intervallo 0.18-0.21. Per motivi pratici lo scarto quadratico medio è poi stato assunto uguale a 0.2 per tutte e tre le macrozone.

Per rappresentare l'attenuazione nelle ZS vulcaniche (vulcani tosco-laziali, Colli Albani, vulcani campani, Etna; zona 4) sono state considerate alcune relazioni di scala specifiche per zone italiane (De Natale et al., 1988; Patanè et al., 1994; 1997). Le relazioni di attenuazione sono state determinate con la tecnica della teoria delle vibrazioni aleatorie a partire dai parametri (attenuazione geometrica 1/r e parametro k) della legge di scala di De Natale et al. (1988) per l'area dei Campi Flegrei, parametri che derivano dall'analisi di diverse decine di sismogrammi digitali di eventi di debole energia, registrati a breve distanza.
Le relazioni di attenuazione che ne derivano sono caratterizzate da valori elevati di amax a brevi distanze ipocentrali, che tendono a decadere rapidamente con la distanza, in accordo con gli effetti osservati che indicano danni generalmente molto localizzati. Poiché le ZS cui si intendono applicare queste relazioni sono simili ma non identiche, sono stati utilizzati come riferimento valori differenziati di stress-drop: 50 bar per le ZS dei vulcani tosco-laziali e di Ischia-Vesuvio; 30 bar per l'Etna e i Colli Albani. Le curve di attenuazione così ottenute sono rappresentate in figura 21b.
Come per le attenuazioni regionali descritte in precedenza, anche per le zone vulcaniche lo scarto quadratico medio è stato assunto uguale a 0.2.

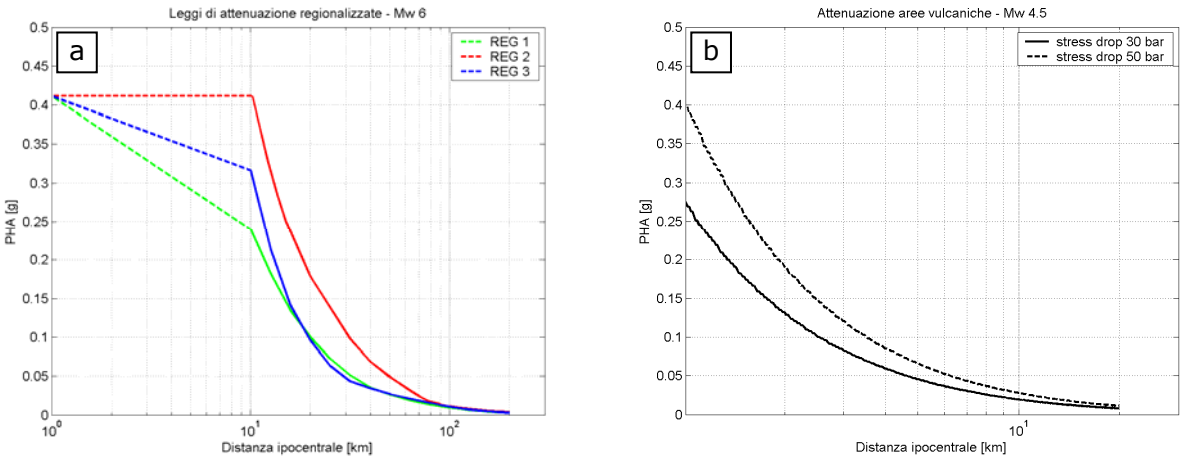


Figura 21. a) Confronto tra le curve di attenuazione valide nelle zone 1 (verde), 2 (rosso) e 3 (blu), per Mw6.0; *b)* confronto tra le curve di attenuazione per le aree vulcaniche calcolate con diversi valori di stress drop, per Mw4.5.

Regionalizzazione e profondità. Per quanto riguarda le porzioni di territorio per le quali non sono ancora disponibili leggi di scala regionalizzate, il problema è stato risolto estendendo i risultati disponibili per le tre macrozone predette a macrozone con caratteristiche crostali analoghe. Poiché questa estensione implica livelli diversi di affidabilità per le varie zone, si è deciso di introdurre alcune alternative, assieme ad alcune legate alla profondità, in due rami dell'albero logico.

Per quando riguarda la regionalizzazione, nel ramo regionale A secondo il modello di Akinci et al. (2004) l'Appennino meridionale e l'Arco Calabro sono stati assimilati alle Alpi occidentali; la Sicilia Settentrionale è stata assimilata all'Appennino; la Piattaforma Apula e la Sicilia Orientale sono state assimilate alle Alpi Orientali (fig.22a). Per le zone vulcaniche sono state adottate le relazioni basate su di De Natale et al. (1988).
Come alternativa, nel ramo regionale B la Piattaforma Apula e l'Appennino meridionale sono stati assimilati all'Appennino centro-settentrionale (fig.22b).

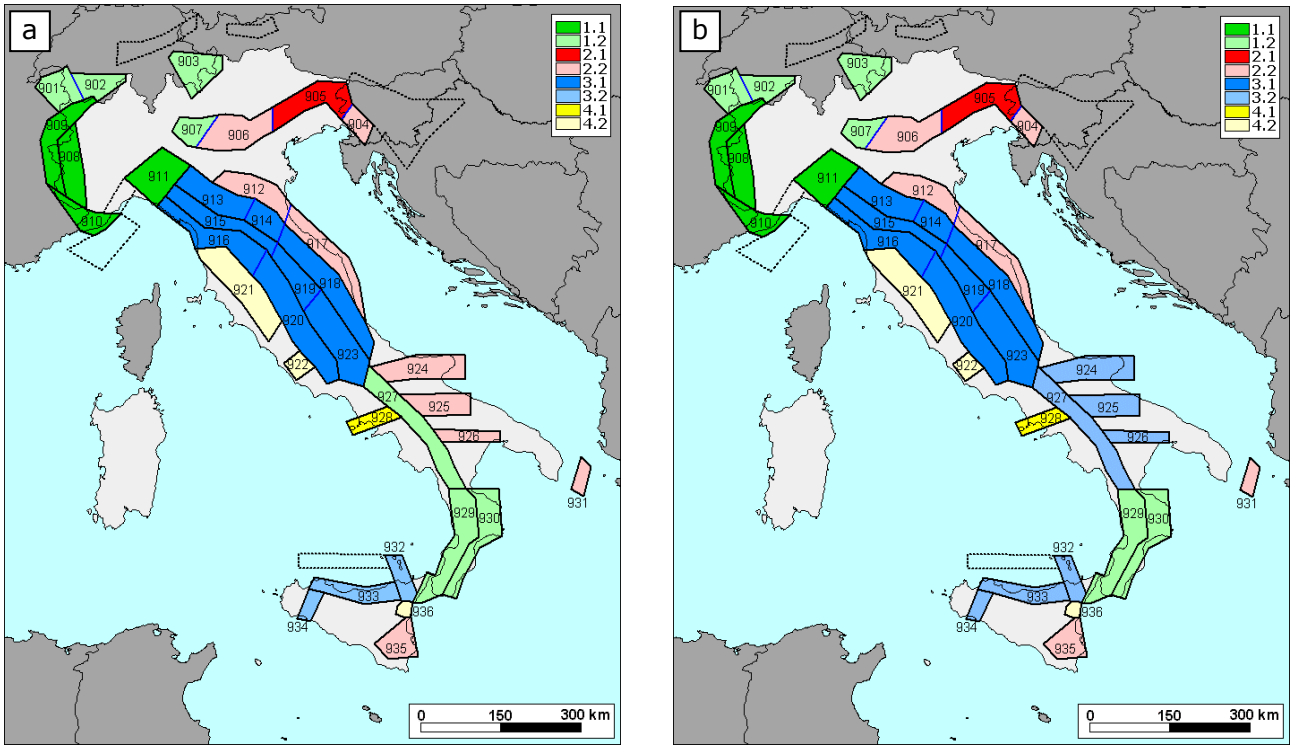


Figura 22. Attribuzione delle relazioni di attenuazione regionali alle ZS nei due rami dell'albero logico. *a)* ramo REG.A; *b)* ramo REG.B. *In legenda*: le classi 1.1, 2.1, 3.1 e 4.1 identificano ZS in cui sono localizzati gli eventi usati per la definizione delle leggi di scala; le classi 1.2, 2.2, 3.2 e 4.2 indicano ZS alle quali le relazioni di attenuazione sono state associate sulla base di analogie del comportamento propagativo.

Per quanto riguarda la profondità, nel ramo REG.A è stata adottato il valore di 10km per tutte le ZS, secondo il modello di Akinci et al. (2004), tranne che per le ZS vulcaniche per le quali è stato adottato il valore di 4 km (fig.23a).
Nel ramo REG.B sono stati utilizzati valori interni alle classi descritte al paragrafo 4, che vengono presentati in fig.23b.

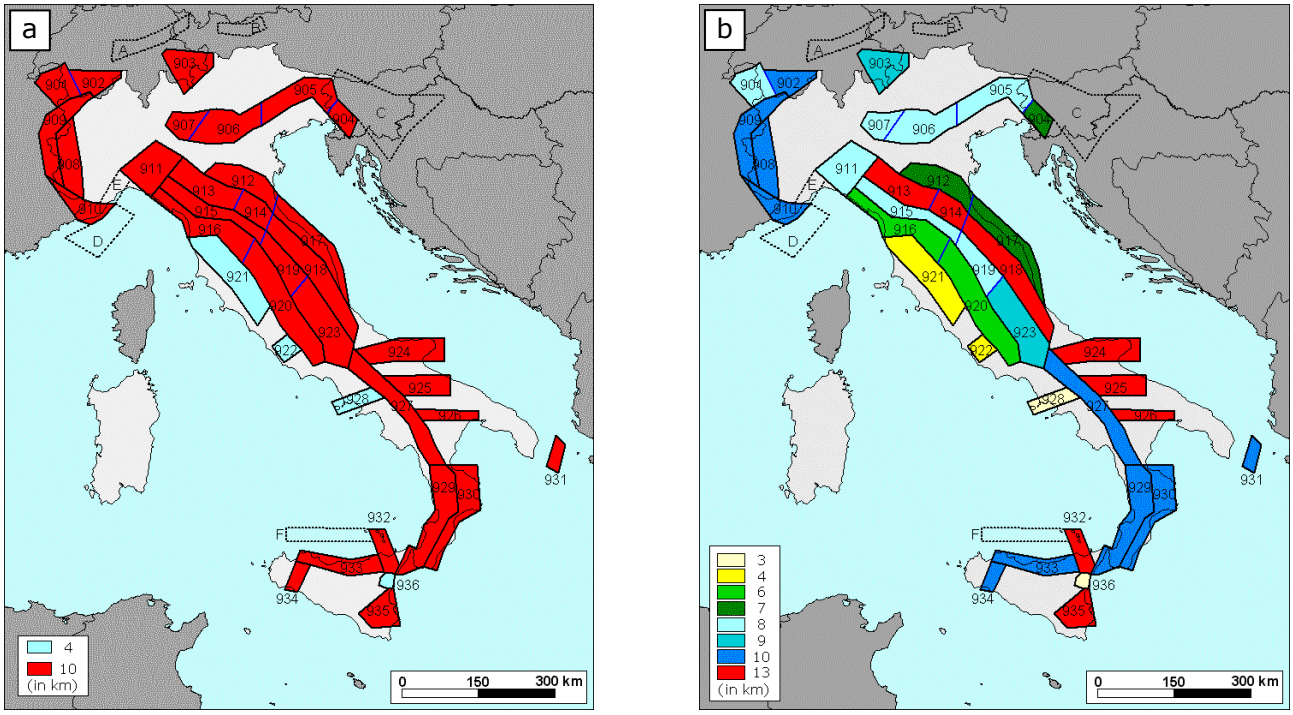


Figura 23. Confronto tra le profondità utilizzate nei due rami dell'albero logico. *a)* profondità utilizzate nel ramo REG.A; *b)* profondità utilizzate nel ramo REG.B.

Anche per quanto riguarda le relazioni regionali la capacità predittiva è stata verificata attraverso il confronto con i valori di amax registrati in occasione di terremoti non compresi nella base di dati utilizzata per definire le relazioni stesse: in particolare i terremoti di Colfiorito (26.09.1997, Mw6.0) e del Molise (31.10.2002, Mw5.8).
I confronti mostrano un accordo accettabile tra valori osservati e valori previsti dalle curve di attenuazione (fig.24a e b) secondo i due modelli (ramo A e ramo B).

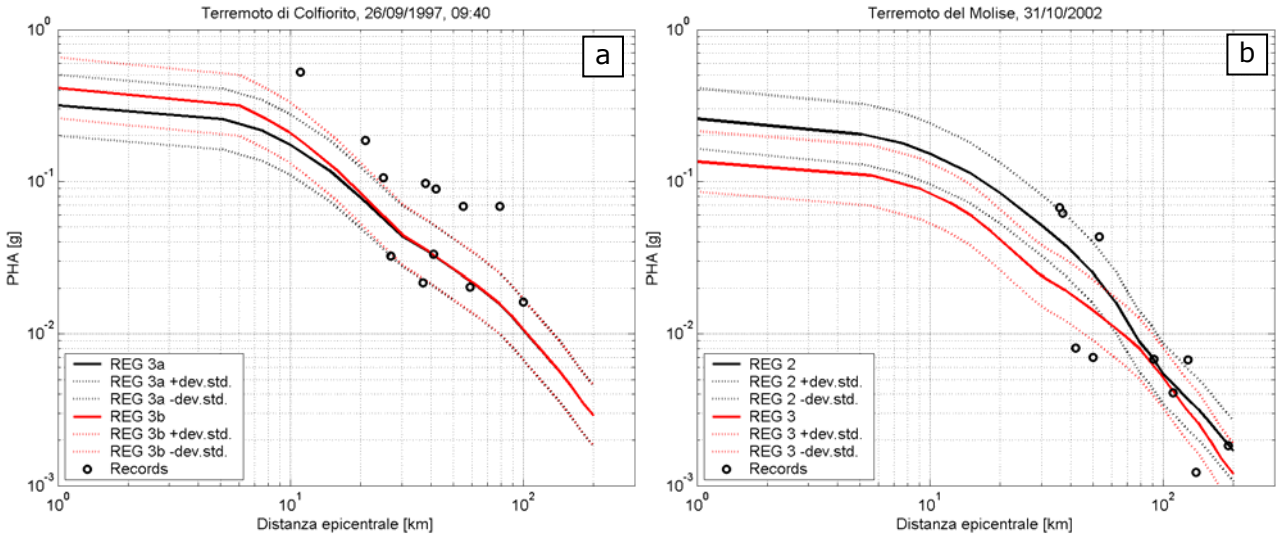


Figura 24. *a)* Confronto tra le curve per Mw6.0 derivate da Malagnini et al. (2000), valide per l'Appennino, con i dati del terremoto di Colfiorito, 1997 (Mw6.0) secondo le profondità del ramo REG.A dell'albero logico (nero) e del ramo REG.B (rosso). *b)* confronto tra le curve regionali per Mw6.0 con i dati del terremoto del Molise, 2002 (Mw5.8) secondo profondità e relazioni del ramo REG.A (nero) e REG.B (rosso).