

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Sezione di Milano

"STUDIO VOLTO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI NELL'AMBITO DEL PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE – AREA CAMPIONE ALTA VAL TIBERINA UMBRA"

Parte I - Definizione del moto sismico di riferimento

Rapporto Finale

1.0 Introduzione

1.1 Valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per la zona di indagine (a cura di M. Stucchi, V. Castelli, I. Leschiutta)

1.1.1 Stato delle conoscenze

1.1.2 Valutazione dei tassi di sismicità.

1.1.3 Definizione delle sorgenti sismiche di riferimento per l'approccio stocastico.

1.2 Valutazione del moto sismico di riferimento (a cura di G. Zonno, F. Meroni, V. Montaldo)

1.2.1 Valutazione probabilistica

1.2.2 Accelerogrammi di riferimento

1.2.3 Accelerogrammi di riferimento con approccio stocastico nella località Città di Castello

1.3 Conclusioni

1.0 Introduzione

Obiettivo di questa parte dell'indagine è la definizione del moto sismico di riferimento per le località oggetto di studio (Fig. 1 e Tab. 1), che servirà come input per le elaborazioni previste dai punti successivi dell'indagine stessa.

A partire dalla valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per l'area (1.1), il moto sismico di riferimento viene calcolato in termini di:

- a) accelerazione spettrale, con un modello probabilistico (1.2.1);
- b) accelerogrammi di riferimento, dai risultati di cui al punto 1.2.2;
- c) accelerogrammi di riferimento, con un modello di tipo stocastico (1.2.3), solo per Città di Castello.

1.1 Valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per la zona di indagine (a cura di M. Stucchi, V. Castelli, I. Leschiutta)

1.1.0 Obiettivo

Valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per la zona di indagine, mediante l'individuazione delle strutture sismogenetiche, la definizione delle loro caratteristiche e della massima magnitudo attesa. Tale valutazione sarà eseguita attraverso la raccolta e l'analisi critica degli elaborati resi disponibili dalle più recenti ricerche coordinate dal GNDT e il loro completamento ove necessario. In tale fase saranno considerati anche i risultati prodotti dallo studio di sismotettonica effettuato dall'Università di Chieti, commissionato dalla stessa Regione Umbria per l'Alta Val Tiberina.

1.1.1 Stato delle conoscenze

Secondo la zonazione sismogenetica corrente, compilata nel 1996, denominata di seguito ZS4 (http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/ZONE/zone_sismo.html; Meletti et al, 2000), le località oggetto di questa indagine sono localizzate (Fig. 2) nella ZS 45, che ha sperimentato negli ultimi 1000 anni, secondo il catalogo NT4.1 (Camassi e Stucchi, 1997) una magnitudo massima pari a 6.2, in occasione dei terremoti del 1352 e del 1458 (tale valore è stato rideterminato rispettivamente in 6.0 e 5.8 dal catalogo CPTI - GdL CPTI, 1999). L'area in esame è esposta anche a terremoti provenienti dalle vicine ZS 40, 44, 46 e 47.

Come è noto, la zonazione sismogenetica ZS4 è stata utilizzata in ambito GNDT, assieme al catalogo NT4.1 e ad altre informazioni, per compilare le carte di pericolosità sismica del territorio nazionale (Slejko et al., 1998; http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/ZONE/zone_sismo.html), di seguito chiamata PS4, e per altre elaborazioni, quali ad esempio le mappe prodotte da Panza (1999). Un'analisi critica dei risultati GNDT di pericolosità sismica per l'area dell'Italia Centrale è presentata da Meletti e Slejko (1999).

Le conoscenze sui caratteri sismogenetici dell'area in esame sono molto aumentate nel periodo successivo al 1996, in particolare a seguito del terremoto umbro-marchigiano del 1997. Una sintesi delle conoscenze sulle faglie attive in Italia

Centrale è disponibile in Barchi et al. (1999); questo elaborato, tuttavia, non copre interamente l'area in esame.

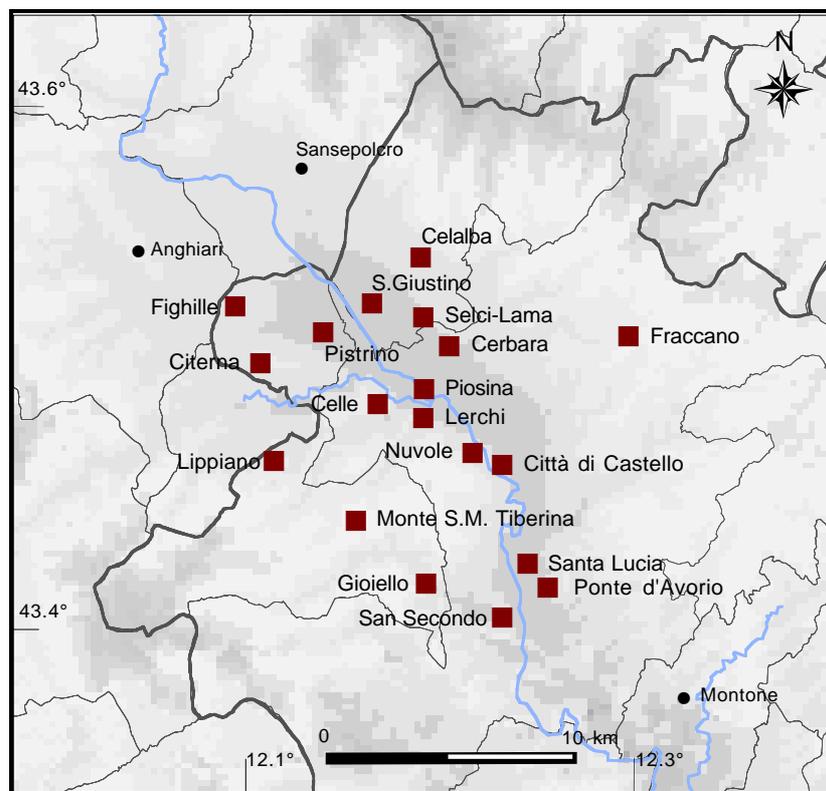


Figura 1 Ubicazione delle località oggetto di studio in questo progetto, descritte in tab. 1.

Codice	NOME della LOCALITA'	latitudine	longitudine
CAS	Città di Castello	43.456	12.239
CEB	Celalba	43.536	12.201
CEL	Celle	43.481	12.176
CER	Cerbara	43.502	12.214
CIT	Citerna	43.498	12.116
FIG	Fighille	43.520	12.104
FRA	Fraccano	43.503	12.307
GIO	Gioiello	43.412	12.197
GIU	S. Giustino	43.519	12.175
LER	Lerchi	43.475	12.199
LIP	Lippiano	43.461	12.121
NUV	Nuvole	43.461	12.224
PIO	Piosina	43.486	12.200
PIS	Pistrino	43.509	12.149
SLA	Selci-Lama	43.513	12.201
SPA	Ponte d'Avorio (PA)	43.409	12.260
SSL	Santa Lucia (SL)	43.418	12.250
SSS	San Secondo (SS)	43.398	12.236
TIB	Monte S.M. Tiberina	43.437	12.162

Tabella 1 Elenco delle località dell'Alta Val Tiberina analizzate in questo studio, con l'indicazione delle rispettive coordinate e del codice.

Un contributo più completo è disponibile in Galadini et al. (2000a), che si avvale dei contributi di Lavecchia et al. (2000); Barchi et al. (2000); Galadini et al. (2000b). Ulteriori considerazioni sono rintracciabili in Lavecchia et al. (2001). Il catalogo europeo delle sorgenti sismogenetiche, sviluppato nell'ambito del progetto EU "FAUST" (<http://faust.ingv.it>) non presenta sorgenti sismiche determinate da dati geologici nella zona di interesse di questa ricerca.

Questa ricerca, infine, non ha preso in considerazione lo studio di sismotettonica effettuato dall'Università di Chieti, commissionato dalla stessa Regione Umbria per l'Alta Val Tiberina, in quanto lo studio stesso non è stato reso disponibile.

A partire dall'aumento delle conoscenze sui caratteri sismogenetici e da diverse analisi critiche e di sensibilità sulle procedure convenzionali di valutazione della pericolosità sismica (si veda ad esempio: Scandone e Stucchi, 1998; Rebez e Stucchi, 2000; Rebez e Slejko, 2000; Stucchi e Albini, 2000; ecc.), il GNDT ha avviato la ricompilazione di una nuova zonazione sismogenetica (Stucchi et al. 2000a; 2000b).

Questa zonazione, tuttavia, alla data odierna non è ancora disponibile; per questa indagine si è quindi deciso di utilizzare ancora la zonazione ZS4, limitatamente alle ZS 40, 44, 45, 46, 47. Le conoscenze sulle sorgenti sismogenetiche più significative per l'area in esame verranno utilizzate solo per l'approccio c) (vedi 1.1.3).

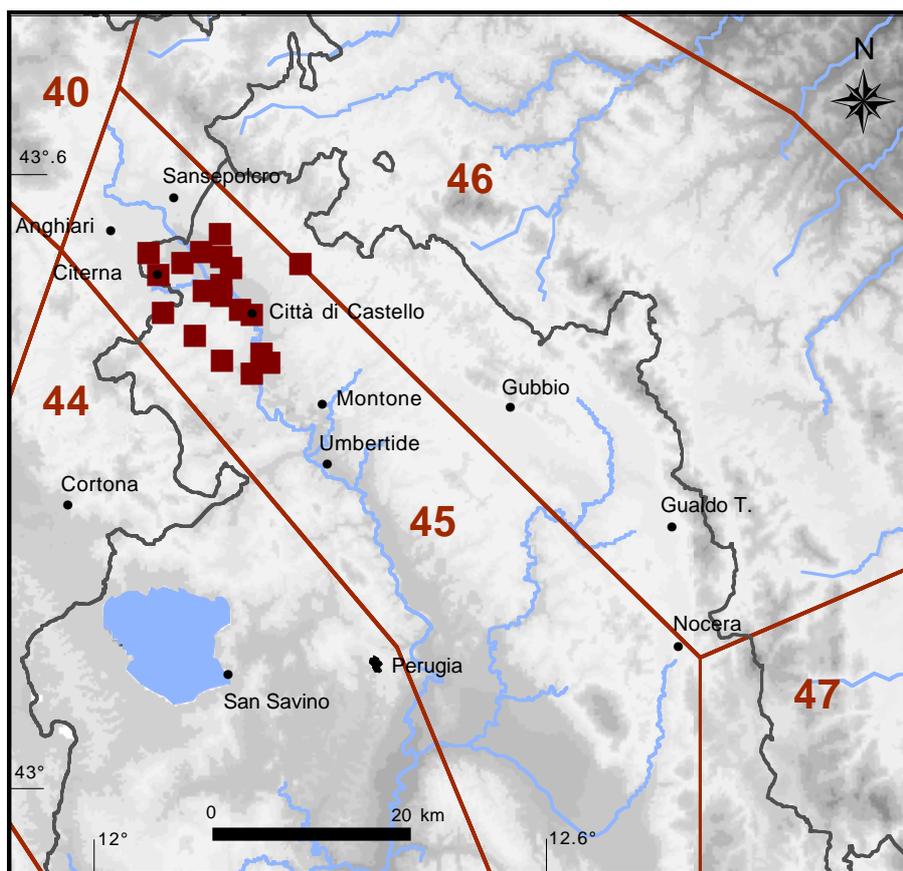


Figura 2 Ubicazione delle località nel contesto della zonazione ZS4.

1.1.2 Valutazione dei tassi di sismicità.

Per quanto riguarda la valutazione dei tassi di sismicità, anche alla luce delle riflessioni sul problema della determinazione degli intervalli di completezza del catalogo (Stucchi e Albinì, 2000), si è ritenuto opportuno mettere a disposizione tre diversi insiemi di tassi:

- 1) tassi utilizzati per la compilazione delle mappe di pericolosità PS4 (ricavati da NT4.1 secondo il metodo illustrato da Slejko et al., 1998);
- 2) tassi ricavati da NT4.1 applicando intervalli di completezza determinati a partire da considerazioni di tipo storico;
- 3) tassi ricavati da CPTI utilizzando gli intervalli di completezza di cui al punto precedente (si noti che non sarebbe concettualmente lecito utilizzare la sismicità definita da CPTI in combinazione con la zonazione ZS4, che è consistente con NT4.1 Tuttavia, nel caso dei terremoti appartenenti alle ZS in questione, le differenze in termini di coordinate epicentrali sono sostanzialmente irrilevanti).

Magnitudo		4.0	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.1	6.4	6.7	7.0
Z.S. 40	[SET 1]		4.65	4.44	0.01	0.57						
	[SET 2]		2.76	2.21	0.01	0.26						
	[SET 3]		2.76	2.21	0.55	0.26	0.13					
Z. S. 44	[SET 1]		9.30	4.55	3.03	0.57						
	[SET 2]		4.97	2.21	1.10	0.79						
	[SET 3]		4.97	2.76	1.10	0.26						
Z. S. 45	[SET 1]		20.93	3.49	6.67	1.06	1.74	0.71				
	[SET 2]		11.6	2.21	3.87	0.79	0.52	0.51				
	[SET 3]	7.18	4.97	2.21	3.87	0.79	0.26	0.51	0.13			
Z. S. 46	[SET 1]		22.22	0.57	0.77	0.57	0.01	0.01	0.71	0.25	0.10	0.09
	[SET 2]		9.39	0.55	0.55	0.52	0.01	0.01	0.38	0.13	0.13	
	[SET 3]		6.63	0.55	1.10	0.13	0.01	0.13	0.38	0.13		
Z.S. 47	[SET 1]		38.37	8.14	10.47	3.49	1.14	1.54	0.25	0.1	0.31	0.06
	[SET 2]		19.34	4.42	7.18	2.1	0.79	0.51	0.13	0.13	0.38	
	[SET 3]		13.81	5.52	6.08	1.84	0.52	0.77	0.01	0.26	0.13	

Tabella 2 - Tassi di sismicità annuali, per le Zone Sorgenti utilizzate in questo studio relative, Denominati rispettivamente PS4 (SET 1), NT4 (SET 2) e CPTI (SET 3).

L'insieme n. 1 non è nient'altro che il dato di partenza utilizzato da PS4, e serve pertanto come riferimento ai valori di pericolosità resi disponibili da quella ricerca. A titolo di confronto si può precisare che i tassi utilizzati per la compilazione della cosiddetta "carta di consenso GNDT-SSN" (Albarelo et al., 2000) non differiscono di molto, in questa zona, da quelli utilizzati da PS4.

Gli insiemi n. 2 e 3 sono stati determinati sviluppando considerazioni di tipo storico, alla luce di riflessioni sul problema della determinazione degli intervalli di completezza del catalogo presentate in alcuni convegni (Stucchi, 1999; Rebez e Stucchi, 2000) e elaborate da Stucchi e Albinì (2000). Il concetto-base che sta dietro a queste considerazioni è che, con limitate eccezioni, terremoti distruttivi ($I_0 \geq 8/9$, $M \geq 5.6$) difficilmente siano sfuggiti alla osservazione e alla registrazione in fonti narrative e/o documentarie in Italia a partire dal 1200.

Questa affermazione, ancora molto preliminare e generica, segue da diverse considerazioni che riguardano principalmente:

- ricchezza attuale delle fonti e della tradizione storiografica
- scarsità di individuazione - nelle ricerche degli ultimi 20 anni - di nuovi terremoti distruttivi, a fronte di consistenti individuazione di falsi eventi

Per i terremoti distruttivi si tratta quindi di articolare nei vari territori l'entità delle possibili eccezioni, che si annunciano più rilevanti - sia pure dell'ordine di grandezza di non più del 10% del numero totale di terremoti di quella classe esistenti nei cataloghi - nelle zone dell'Italia meridionale.

Per quanto riguarda l'area in cui ricadono le ZS in esame, la distribuzione della sismicità fornita dai due cataloghi e gli intervalli di completezza adottati rispettivamente nel primo e nel secondo + terzo caso sono rappresentati in Fig. 3.

In quest'area la copertura di fonti storiche è particolarmente buona, e così pure la tradizione storiografica; si ritiene pertanto che i cataloghi possano essere considerati completi al di sopra di $M = 5.6$ a partire dal 1200. A titolo di paragone si osservi che in PS4 la completezza di questa classe veniva raggiunta soltanto nel 1800.

Il confronto fra le due distribuzioni degli intervalli di completezza (rosso = PS4, considerazioni sismologico-statistiche; blu = HST, considerazioni storico-sismologiche) evidenzia come PS4 finisca per non prendere in considerazione un notevole numero di terremoti medio-forti (terremoti compresi fra le due spezzate).

Per contro, PS4 si spinge a affermare la completezza del catalogo per i terremoti più forti ($M \geq 6.7$) fino all'anno 1000, cosa che HST non si sente di fare per ragioni di cautela generale, anche se sembra che questa valutazione di PS4 sia del tutto ragionevole. In questo caso, tuttavia, le discrepanze non danno luogo a divergenze nei calcoli dei tassi, in quanto i cataloghi non contengono terremoti di quella classe di energia nel periodo precedente il 1200 (nel caso di CPTI, peraltro, fino a tutto il 1600).

Per quanto riguarda le classi inferiori alla soglia $M = 5.6$, considerazioni di tipo storico-sismologico analoghe a quelle presentate per le classi superiori non sono possibili, quanto meno con lo stesso margine di errore ipotizzato in quel caso (10%). Gli intervalli HST in queste classi sono stati determinati pertanto da un misto di considerazioni storiche e sismologiche. E' comunque da sottolineare che le differenze fra le due distribuzioni non sono rilevanti e che il contributo di queste classi alla valutazione dell'hazard è certamente meno importante di quello delle classi più elevate.

I tre insiemi di tassi così ricavati sono presentati in Fig.4 e Tab.2.

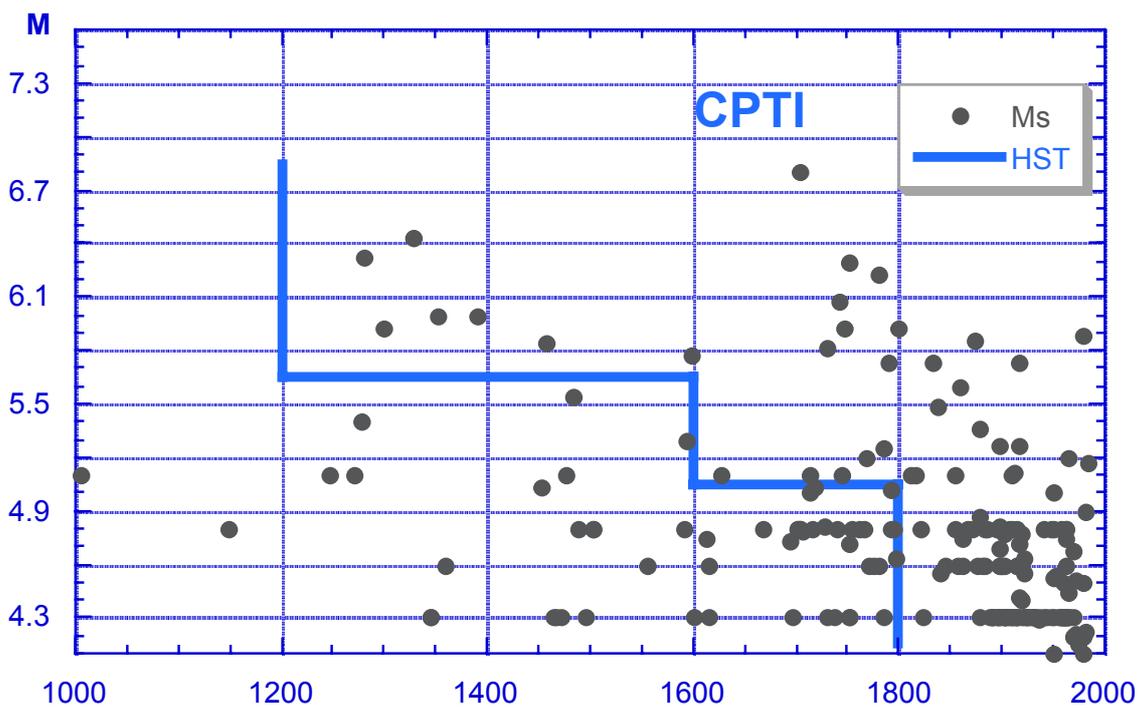
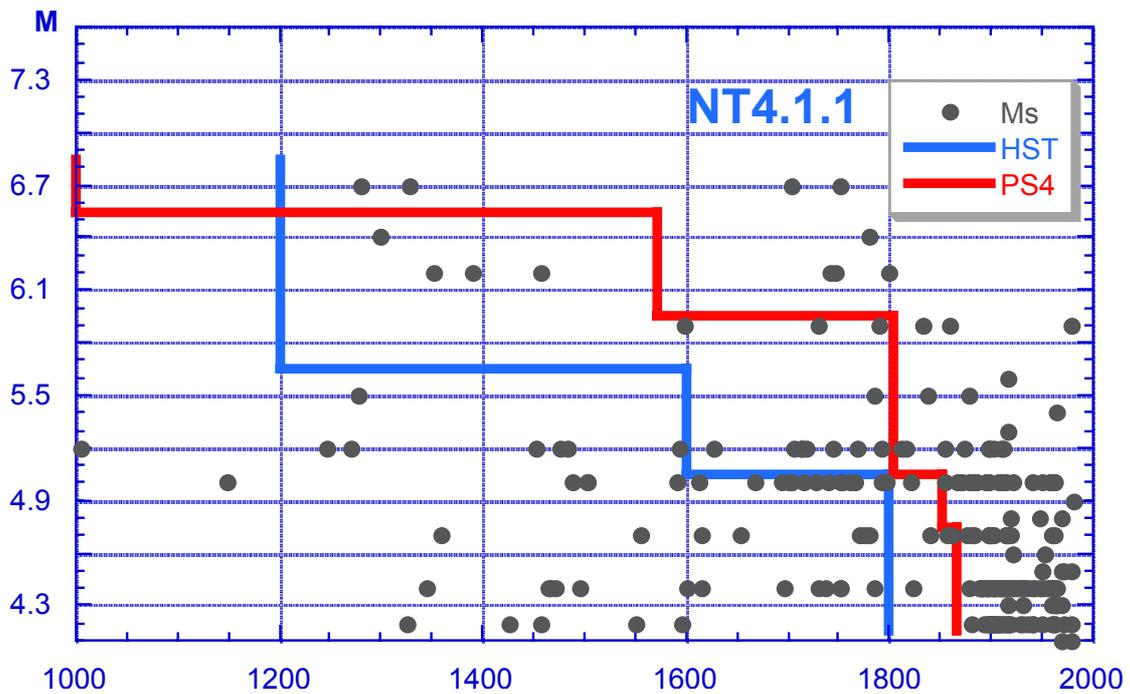


Figura 3. Distribuzione della sismicit  fornita dai due cataloghi (NT4.1 e CPTI) e intervalli di completezza adottati per la valutazione dei tassi di sismicit  della zona in esame. Rosso: intervalli di completezza utilizzati per la compilazione delle mappe di pericolosit  PS4 (da NT4.1, Slejko et al., 1998); Blu: intervalli di completezza determinati a partire da considerazioni di tipo storico.

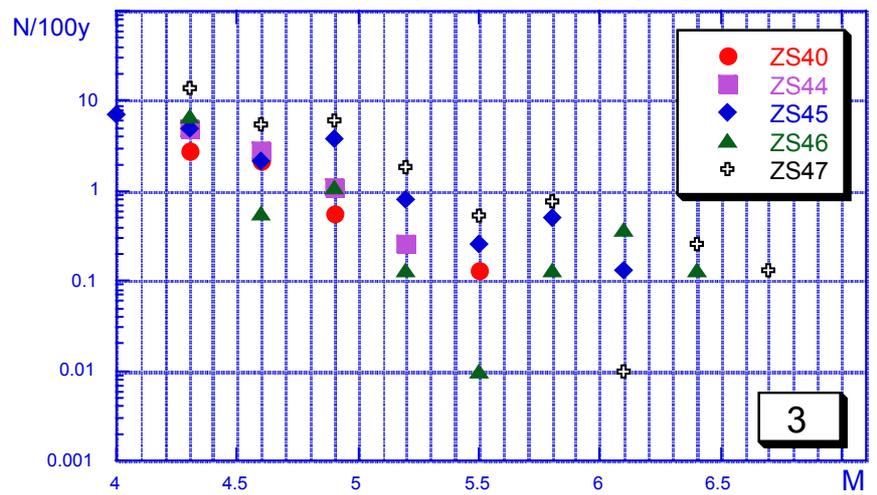
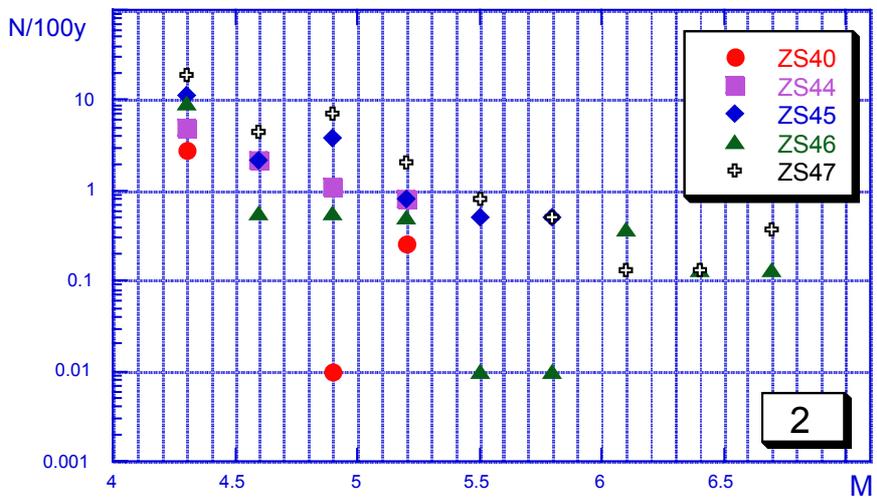
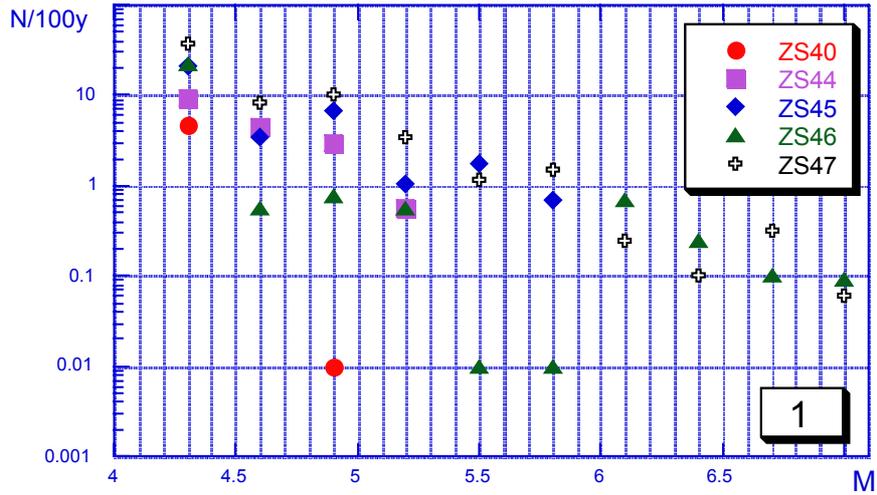


Figura 4 La figura mostra i tre insiemi di tassi di sismicit  ricavati come descritto nel testo ed elencati in tab. 2.

1.1.3 Definizione delle sorgenti sismiche di riferimento per l'approccio stocastico.

La Fig. 5 sintetizza lo stato delle conoscenze sulle sorgenti dei terremoti con $M \geq 5.5$, come risulta dall'inventario speditivo delle sorgenti potenziali di terremoti distruttivi, i cui criteri sono descritti da Meletti et al. (2000).

Questo inventario contiene sorgenti desunte da dati geologici (Galadini et al., 2000) e da dati storici (Boschi et al., 1997; Monachesi e Stucchi, 1997) elaborati secondo la metodologia proposta da Gasperini et al. (1999).

La figura mostra nell'area di Città di Castello due sorgenti individuate con indagini geologiche (Meletti et al., 1993): una ad ovest della città (AVT.O, Alta Val Tiberina Ovest), della lunghezza di circa 11 km e una a est (AVT.E, Alta Val Tiberina Est) della lunghezza di circa 7 km.; queste due sorgenti possono generare terremoti rispettivamente di $M = 6.2$ e $M = 6.0$ (Wells e Coppersmith, 1994). Alla prima sorgente possono essere associati, con buona probabilità, il già citato terremoto del 1352 (l'orientamento ortogonale della box può essere dovuto alla scarsa definizione del dataset di intensità) e il terremoto del 1917 ($M = 5.7$ secondo il catalogo CPTI). Alla seconda può essere associato, con buona probabilità, l'evento del 1789 (anch'esso con $M = 5.7$ secondo il catalogo CPTI).

L'evento del 1789 è stato recentemente studiato intensivamente, utilizzando fonti primarie fin qui non utilizzate per scopi di sismologia storica, con la produzione di un set di circa 60 punti di intensità (Castelli, 2001). Da questi dati sono stati ricavati i parametri del terremoto, che non si discostano di molto da quelli forniti da CPTI: $M = 5.7$; coordinate epicentrali di fatto coincidenti. La box di colore verde nella Fig. 5 rappresenta l'immagine della sorgente determinata dai nuovi dati secondo l'approccio di Gasperini et al. (1999).

Questa sorgente è probabilmente parte del sistema di sorgenti appenniniche che prosegue con le sorgenti di Gubbio e poi con quelle responsabili dei terremoti del 1997/1998 (Gualdo Tadino, Nocera Umbra, Colfiorito, Preci, Norcia, ecc.). In particolare, a questo sistema potrebbe essere associato con considerazioni analoghe a quelle formulate per l'evento del 1352, il terremoto del 1458 ($M = 5.8$), mentre permangono maggiori dubbi sulla possibile associazione al sistema stesso dell'evento del 1389 ($M = 6.0$).

Questi terremoti potrebbero comunque non saturare il potenziale sismogenetico dell'eventuale sistema completo. A meno quindi che non venga rintracciato qualche terremoto sconosciuto o che qualche terremoto conosciuto non venga rivalutato in termini energetici, è quindi ragionevole ipotizzare una o più lacune sismiche ad una distanza non troppo rilevante dalle località di indagine.

A partire da queste considerazioni, è stato deciso di adottare, a titolo cautelativo e ai soli fini di questa indagine, come sorgenti del terremoto di riferimento la sorgente n. 1, cui è attribuito il terremoto del 1789, e una sorgente ipotetica (n. 2), all'incirca delle stesse dimensioni, situata immediatamente a sud di quella precedente, in continuità con la sorgente precedente (Fig. 6). Si ribadisce che questa sorgente, che potrebbe peraltro essere responsabile dell'evento del 1458, viene presa in considerazione in questa indagine come scelta di tipo cautelativo, data la vicinanza della sorgente stessa a Città di Castello.

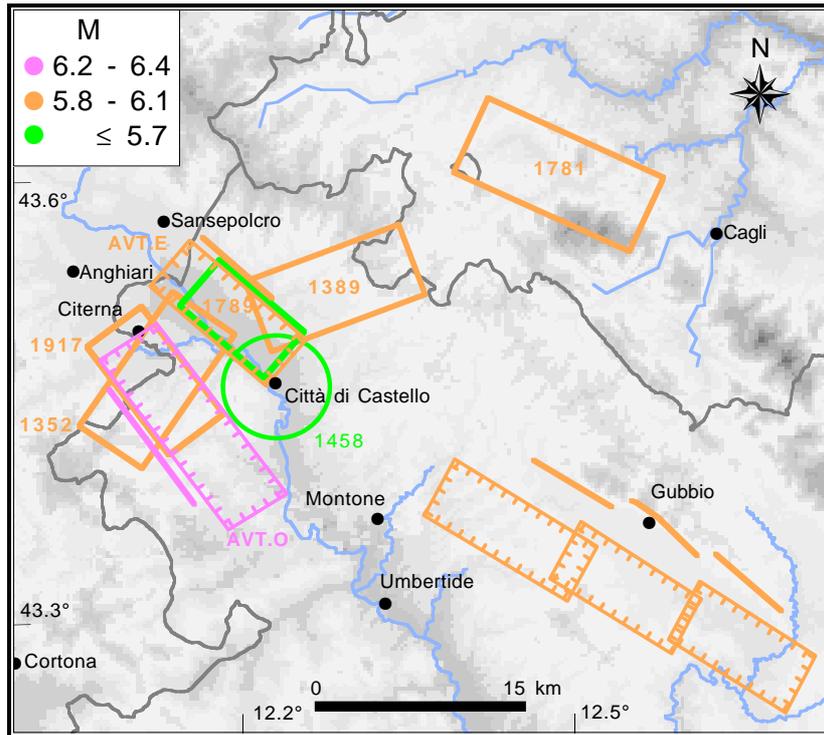


Figura 5 Stato delle conoscenze sulle sorgenti dei terremoti con $M \geq 5.5$, come risulta dall'inventario speditivo delle sorgenti potenziali di terremoti distruttivi (Meletti et al., 2000).

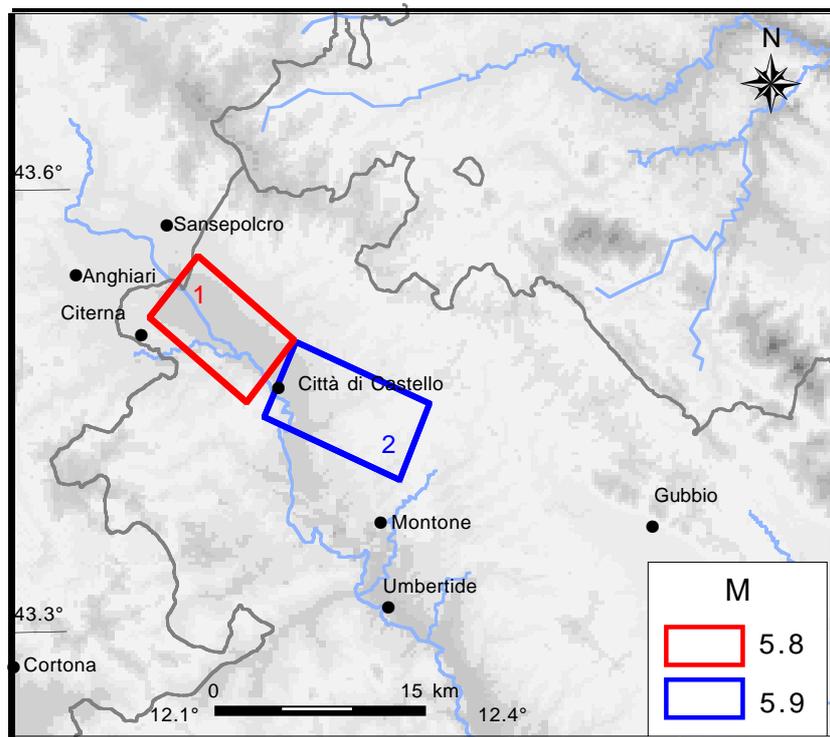


Figura 6 Sorgenti ipotizzate in questo studio come input per l'approccio di tipo stocastico.

1.2 Valutazione del moto sismico di riferimento

(a cura di G. Zonno, F. Meroni, V. Montaldo)

1.2.0 Obiettivi

La stima del moto sismico di riferimento, da utilizzare come ingresso per la valutazione degli effetti di sito e confronto con i dati sperimentali, è stata svolta sviluppando i seguenti punti, come definito nell'allegato tecnico:

- *Valutazione della pericolosità in termini di ordinate spettrali di spettro di risposta con damping 5%. Saranno utilizzate le leggi di attenuazione già disponibili in letteratura considerando le registrazioni accelerometriche dei terremoti del catalogo ENEL-SSN disponibili per l'area.*
- *Determinazione di accelerogrammi di riferimento secondo procedure già sperimentate per le altre indagini di microzonazione sopra citate.*
- *Determinazioni del moto di riferimento con approccio stocastico, solo per Città di Castello, sulla base del terremoto più significativo verificatosi nell'area (approccio tipo scenario). Una analisi parametrica è stata effettuata per misurare il range di variabilità della stima stocastica del moto di riferimento in funzione dell'incertezza di alcuni parametri usati nel modello stesso.*

1.2.1 Valutazione probabilistica del moto sismico di riferimento

La valutazione probabilistica del moto sismico di riferimento è basata sull'approccio probabilistico classico di Cornell utilizzando il codice di calcolo SEISRISK III (Bender and Perkins, 1987). La metodologia adottata in questo studio corrisponde alla procedura standard per la valutazione della pericolosità riconosciuta in tutto il mondo, che è stata già utilizzata in precedenti studi sull'area in esame tra cui si ricordano i lavori del GNDT-SSN, che nell'ambito del progetto di Microzonazione sismica dell'Umbria-Marche hanno valutato la pericolosità sismica nelle città di Nocera Umbra e Sellano (rispettivamente Bozzano et al., 1999; Guadagno et al., 1999).

I dati di input che necessita il programma SEISRISKIII sono:

- modello delle zone sorgenti, dal paragrafo 1.1.2 (vedi figura 2)
- tassi di sismicità per ogni zona sorgente, dal paragrafo 1.1.2 (vedi figura 3)
- leggi di attenuazione, da letteratura.

Per quanto riguarda l'ultimo punto, alcune leggi come quelle di Sabetta e Pugliese (1987 e 1996) sono valide esclusivamente per l'Italia in quanto sono state calcolate a partire da registrazioni di terremoti italiani, altre come quelle di Ambraseys et al. (1995 e 1996) sono valide per l'Europa. (Le leggi di attenuazione citate verranno di seguito indicate con le seguenti sigle: SP87, SP96, AMB95 e AMB96).

Relativamente all'uso del codice di calcolo SEISRISKIII, le seguenti assunzioni sono da tenere in considerazione: si usa l'opzione del programma che elabora singolarmente, per ogni livello di magnitudo, i tassi di sismicità, cioè non si usa l'interpolazione lineare degli stessi (stima del coefficiente b della relazione Gutenberg-Richter); le leggi di attenuazione sono tabulate in matrici, come richiesto dal programma, composte da 8 valori di magnitudo (7.5, 7.0, 6.5, 6.0, 5.5, 5.0, 4.5 e 4.0) e da 20 valori di distanze (1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 167, 183 e 200 km).

1.2.1.1 Analisi parametriche su Città di Castello

Una analisi parametrica su Città di Castello è stata effettuata valutando in modo probabilistico il picco di accelerazione (PGA) e lo spettro di risposta (PSA (5% damping) corrispondenti al 90% di probabilità di non-eccedenza in 50 anni, cioè ad un periodo di ritorno di 475 anni.

Per la stima del PGA si sono utilizzate le leggi di attenuazione SP87 e AMB95 e il valore è stato determinato per ciascuno dei diversi insiemi di tassi di sismicità (SET 1, SET 2 e SET 3) come definiti in precedenza (vedi 1.1.2).

I risultati dell'analisi puntuale effettuata al sito di Città di Castello sono riassunti in tabella 3.

Città di Castello		$\sigma = 0$	$\sigma = 0.24$
AMB95	SET 1	0.200g	0.334g
	SET 2	0.176g	0.276g
	SET 3	0.173g	0.268g
SP87	SET 1	0.149g	0.251g
	SET 2	0.129g	0.207g
	SET 3	0.128g	0.201g

Tabella 3 Confronto tra i valori di PGA ottenuti al sito di Città di Castello, corrispondenti al 90% di probabilità di non-eccedenza in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni). Si sono usate le leggi di attenuazione SP87 e AMB95, considerando i valori di deviazione standard σ uguali rispettivamente a 0 e 0.24, i tassi di sismicità che sono stati utilizzati sono quelli indicati come: SET 1, SET 2 e SET 3.

Il valore di PGA calcolato con AMB95 sul SET 1 (0.334g) includendo nel calcolo una deviazione standard σ (in unità logaritmiche) pari a 0.24, corrisponde al valore puntuale estratto dalla mappa PS4 (Rebez, comunicazione personale) ed è congruente con il lavoro di Slejko et al. (1998) relativo alla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, nota come PS4.

Si ricordano, per confronto, i risultati ottenuti in lavori precedenti: nell'ambito del già citato progetto di Microzonazione sismica dell'Umbria-Marche, GNDT-SSN hanno determinato per Nocera Umbra valori di PGA pari a 0.246g con AMB96 e di 0.238g con SP87 (Bozzano et al., 1999), mentre per Sellano sono stati calcolati i valori 0.315g con AMB96, e 0.296g con SP87 (Guadagno et al., 1999). Recentemente studi di microzonazione effettuati a Fabriano (Monachesi et al., 2000) usando il catalogo NT4.1, hanno determinato PGA pari a 0.249g con AMB96 e 0.253g con SP87.

In figura 7 sono rappresentati gli spettri di accelerazione (PSA) con periodo di ritorno di 475 anni, calcolati utilizzando le leggi di attenuazione spettrale SP96 (linee tratteggiate) e AMB96 (linee continue), anche in questo caso su tre diversi insiemi di tassi (SET 1 in blu, SET 2 in rosso e SET 3 in verde). In tutti i casi il valore della deviazione standard σ è uguale a zero.

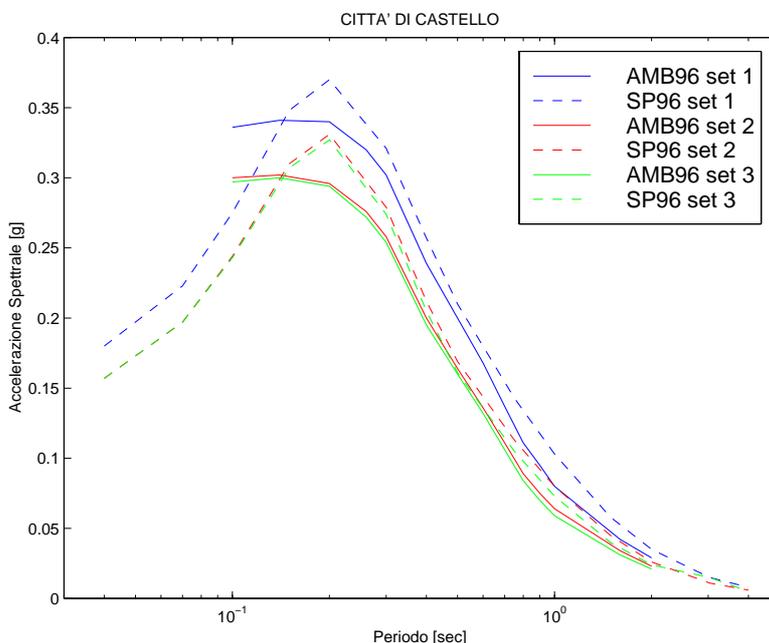


Figura 7 Confronto tra gli spettri di risposta PSA (5% damping), ottenuti al sito di Città di Castello corrispondenti al 90% di probabilità di non-eccedenza in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni). Si è fatto uso delle leggi di attenuazione SP96 e AMB96 (senza considerare la deviazione standard σ), utilizzando rispettivamente i tassi di sismicità indicati nel SET 1 (in blu), SET 2 (in rosso) ed il SET 3 (in verde).

Dalla figura 7 si può osservare che le leggi di attenuazione impiegate sono definite su diversi intervalli di periodo (e quindi di frequenza): infatti SP96 varia tra 0.04 e 4 secondi, mentre AMB96 è limitata nell'intervallo tra 0.1 e 2 secondi. In generale gli spettri calcolati applicando la relazione SP96 hanno valori maggiori di AMB96, e le curve di PSA che si riferiscono al SET 1 (in blu) sono maggiori di quelle relative ai SET 2 e 3, quasi coincidenti (rispettivamente in rosso e verde).

1.2.1.2 Analisi probabilistica per tutte le località in indagine

Sulla base di quanto sperimentato su Città di Castello si è scelto di utilizzare, per tutte le località dell'Alta Val Tiberina, i tassi di sismicità corrispondenti al SET 3 (che deriva dalla più aggiornata analisi effettuata sul catalogo CPTI), e le leggi di attenuazione di Sabetta e Publiese (1987 e 1996). La legge SP87 è stata usata per calcolare i PGA, mentre la legge SP96, molto usata in precedenti lavori, è stata considerata più idonea al calcolo degli spettri di risposta dato il range di frequenza più esteso.

Per tutte le 18 località dell'Alta Val Tiberina (Fig. 1 e tab. 1) si sono valutati i valori di PGA e gli spettri di risposta PSA (5% damping) corrispondenti al 90% di probabilità di

non-eccedenza in 50 anni, considerando cioè un periodo di ritorno di 475 anni. Nel calcolo degli spettri di risposta, per ciascuna frequenza è stato inserito il valore della corrispondente deviazione standard σ , come specificato nelle equazioni di Sabetta e Pugliese (1996).

La carta rappresentata in figura 8 mostra le località oggetto di studio raggruppate in quattro classi di colore, sulla base del valore di PGA (in g) ottenuto dall'analisi probabilistica. La variazione in termini di picco di accelerazione PGA è limitata perché le località sono poco disperse e sono tutte comprese all'interno della zona sorgente n. 45. Un effetto più marcato si può notare per Fraccano, che si trova vicino al bordo della zona sorgente 45. Un effetto analogo, anche se meno marcato, è osservabile a Lippiano, Celalba e Fighille (si veda anche la tabella 4).

LOCALITA'	SIGLA	PGA (475 anni P.R.)	Nome files Accelerazione
Città di Castello	CAS	0.201	acc_cas.dat
Celalba	CEB	0.193	acc_ceb.dat
Celle	CEL	0.200	acc_cel.dat
Cerbara	CER	0.198	acc_cer.dat
Citerna	CIT	0.197	acc_cit.dat
Fighille	FIG	0.195	acc_fig.dat
Fraccano	FRA	0.180	acc_fra.dat
Gioiello	GIO	0.197	acc_gio.dat
Lerchi	LER	0.200	acc_ler.dat
Lippiano	LIP	0.192	acc_lip.dat
Monte S.M. Tiberina	TIB	0.196	acc_tib.dat
Nuvole	NUV	0.201	acc_nuv.dat
Piosina	PIO	0.200	acc_pio.dat
Pistrino	PIS	0.199	acc_pis.dat
Ponte d'Avorio (PA)	SPA	0.202	acc_spa.dat
S.Giustino	GIU	0.198	acc_giu.dat
San Secondo (SS)	SSS	0.200	acc_sss.dat
Santa Lucia (SL)	SSL	0.202	acc_ssl.dat
Selci-Lama	SLA	0.198	acc_sla.dat

Tabella 4 Elenco delle località analizzate in questo studio per il progetto Alta Val Tiberina. Per ogni sito sono riportati i valori di PGA e i nomi degli accelerogrammi simulati (corrispondenti ad un periodo di ritorno (P.R.) di 475) ottenuti utilizzando le leggi spettrali di Sabetta e Pugliese (1996) e la deviazione standard propria di ciascuna frequenza.

Nella figura 9 sono rappresentati insieme tutti gli spettri di accelerazione calcolati per Città di Castello e le restanti 18 località dell'Alta Val Tiberina: gli spettri disegnati con le linee continue sono quelli che si ottengono usando i valori di deviazione standard (σ) propri di ciascuna frequenza, mentre gli spettri tratteggiati sono stati ottenuti senza considerare deviazione standard ($\sigma = 0.0$). Da notare che le 14 leggi di

attenuazione spettrali definite da SP96, usate in questo studio, sono relative solo a 14 valori di frequenza compresi nell'intervallo 0.25 e 25 Hz (0.25, 0.33, 0.50, 0.67, 1.00, 1.33, 2.00, 2.50, 3.33, 5.00, 6.67, 10.00, 15.00 e 25.00 Hz).

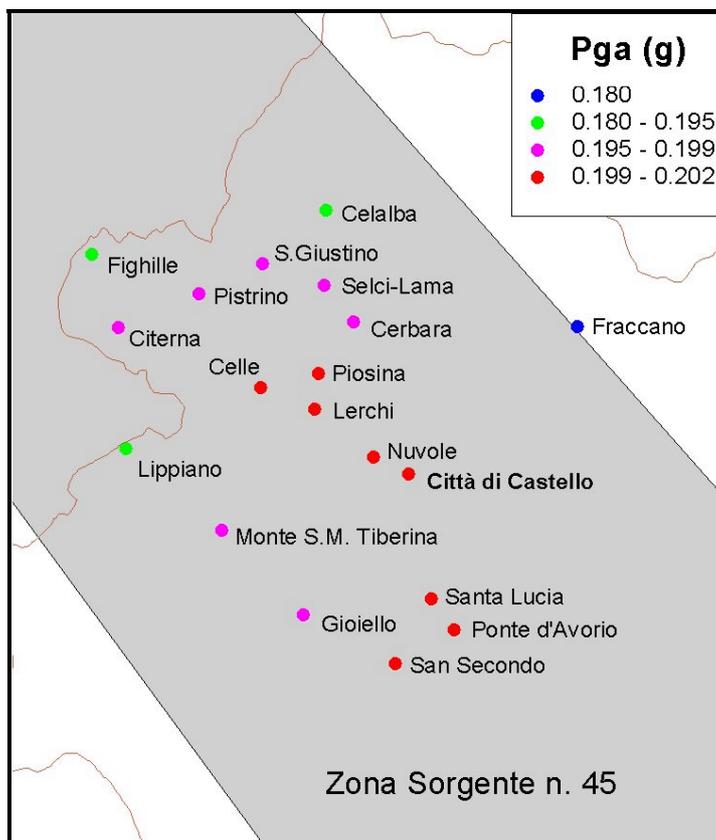


Figura 8 In figura è mostrato un ingrandimento (riquadro di figura 3) con le tutte le località analizzate e una visualizzazione dei valori di PGA ottenuti con SEISRISK III (vedi tab. 4) considerando un periodo di ritorno di 475 anni, i tassi di sismicità dell'insieme SET3 ed i valori della deviazione standard propri di ciascuna frequenza.

1.2.2 Accelerogrammi di riferimento

L'accelerogramma di riferimento è stato calcolato con il codice di calcolo SIMQKE1 (Gasparini e Vanmarcke, 1976): un programma efficiente, internazionalmente riconosciuto ed usato per generare le time histories a partire da uno spettro target. Il programma SIMQKE1 calcola gli accelerogrammi sintetici nel dominio delle frequenze come combinazione di uno spettro delle ampiezze, rappresentato dallo spettro di potenza, e di uno spettro di fase, calcolato attraverso la trasformata di Fourier a partire da un segnale ottenuto filtrando un rumore bianco.

I dati di input che il programma SIMQKE1 necessita sono:

- il valore di PGA nella località di indagine, cioè il picco di accelerazione (*amax*) stimato attraverso SEISRISKIII, usando SP87 con periodo di ritorno di 475 anni

- lo spettro target, rappresentato nel nostro caso dalle curve di accelerazione spettrale PSA (5% damping), con periodo di ritorno di 475 anni, stimate attraverso SEISRISKIII, con le leggi SP96
- parametri aggiuntivi per la riproduzione dello spettro target

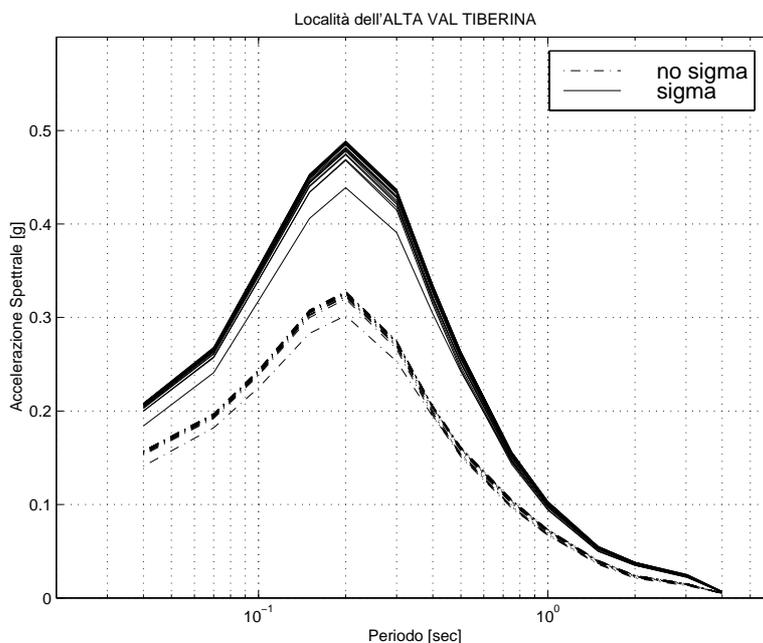


Figura 9 Nella figura sono rappresentati insieme tutti gli spettri di accelerazione per Città di Castello e per le 18 località dell'Alta Val Tiberina, con sigma uguale a zero (linee tratteggiate) e con la sigma propria di ciascuna frequenza (linee continue).

Il programma SIMQKE1 presenta una serie di opzioni, ovvero consente di intervenire sui parametri attraverso i quali si può calibrare la generazione della time history: nel caso in esame le numerose prove effettuate al sito di Città di Castello hanno permesso di definire la combinazione di parametri che fornisce il miglior risultato in termini di confronto tra lo spettro target e lo spettro risultante dal programma.

Le opzioni selezionate sono le seguenti: il parametro che controlla la forma della funzione di involuppo dell'intensità (*icase*) è posto uguale a 5, il che equivale a selezionare una forma caratterizzata da una salita proporzionale a t^2 nei primi 4 secondi (parametro *trise*=4), quindi un andamento piatto per 11 secondi imposto dal parametro *tlevel*, a cui segue una prima discesa esponenziale dopo la quale il segnale decresce come t^2 . La durata totale dell'accelerogramma (*dur*) è uguale a 20 secondi, mentre il picco di accelerazione (*amax*) corrisponde al valore di PGA ottenuto considerando un periodo di ritorno di 475 anni e utilizzando la legge di attenuazione SP87 con una deviazione di 0.24 (in unità logaritmiche).

La figura 10 mostra i risultati della simulazione a Città di Castello: nella parte alta della figura sono messi a confronto lo spettro di risposta PSA (5% damping)

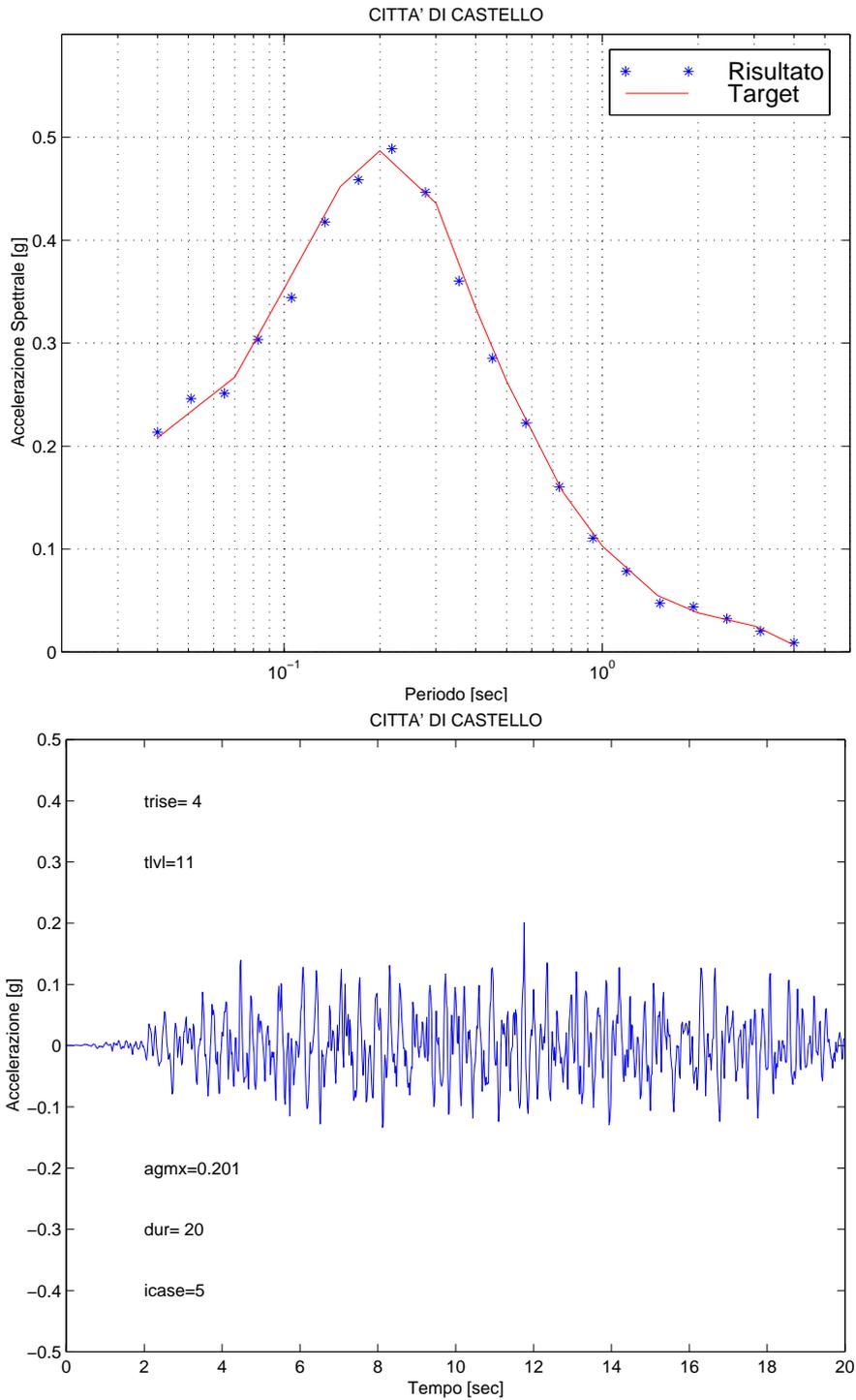


Figura 10 Nella parte bassa della figura è rappresentato l'accelerogramma di riferimento ottenuto al sito di Città di Castello applicando il programma SIMQKE1 (con i parametri indicati anche all'interno della figura), mentre l'immagine in alto mostra il confronto tra lo spettro target e lo spettro calcolato (in termini di PSA 5% damping). La curva di accelerazione spettrale si riferisce al 90% di probabilità di non-eccedenza in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 475 anni (uso del programma SEISRISK III con i ratei di sismicità specificati dati da SET 3).

risultante dalla simulazione, e lo spettro target calcolato in modo probabilistico come descritto nel paragrafo precedente (SP96; SET 3; periodo di ritorno di 475 anni corrispondente al 90% di probabilità di non-eccedenza in 50 anni). In basso, invece, è rappresentato l'accelerogramma di riferimento generato da SIMQKE1.

L'analisi probabilistica effettuata su Città di Castello è stata ripetuta per le restanti località dell'Alta Val Tiberina indicate nella tabella 1, ed i risultati, in termini di accelerogramma di riferimento, sono forniti come allegato a questo rapporto. La tabella 4 riassume i nomi dei files che si riferiscono a ciascuna località esaminata.

1.2.3 Moto di riferimento con approccio stocastico in Città di Castello

La valutazione del moto di riferimento in un sito effettuata con approccio stocastico può essere utile perché rappresenta una stima ragionata dello scuotimento, intendendo con questo una stima che tiene conto delle informazioni geologiche, sismologiche, geofisiche disponibili per l'area studiata. Nel caso in esame, anche le informazioni storiche sono importanti dal momento che l'analisi è stata fatta a partire dai dati di un terremoto storico di riferimento (paragrafo 1.1.3).

Le metodologie stocastiche utilizzano un modello geofisico semplificato e quindi non sono immuni da incertezza, tuttavia se le informazioni di partenza sono verosimili, la stima stocastica dei parametri di scuotimento può essere considerata attendibile.

La valutazione del moto di riferimento con approccio stocastico è stata effettuata usando il programma FINSIM (Beresnev and Atkinson, 1998), che generalizza la tecnica stocastica di simulazione del ground motion sviluppata per sorgenti puntiformi da Boore (1983) al caso di faglia discreta.

I dati di input che necessita il programma FINSIM sono:

- dimensione e giacitura della sorgente, ricavate dall'analisi di cui al paragrafo 1.1.3
- parametri aggiuntivi di sorgente, da letteratura e/o ipotizzati
- parametri che definiscono un modello geofisico, adeguato all'area in esame

Le informazioni necessarie per la definizione delle sorgenti sismiche di riferimento per la valutazione del moto di riferimento con approccio stocastico sono state fornite al termine dello studio descritto nel paragrafo 1.1.3, e le strutture analizzate in questo paragrafo sono rappresentate nella figura 6. Ciascuna delle due sorgenti, denominate 1 e 2 procedendo da NW verso SE, è stata utilizzata per generare un accelerogramma sintetico ed il corrispondente spettro di risposta al sito di Città di Castello.

Ogni sorgente, supposta rettangolare, viene suddivisa in sub-faglie, ciascuna delle quali rappresenta una sorgente puntiforme caratterizzata da uno spettro ω^2 . La rottura si propaga radialmente dall'ipocentro (in questo studio ipotizzato sempre al centro delle sorgenti) e man mano che raggiunge le sub-faglie le attiva. Il programma FINSIM necessita di informazioni riguardanti la sorgente ed il modello geofisico semplificato dell'area in esame (parametri ricavati da letteratura e/o ipotizzati), inoltre nella stima dell'accelerogramma di riferimento vengono utilizzati opportuni modelli di

attenuazione geometrica ed anelastica, e viene ipotizzata una velocità di rottura sul piano di faglia (vedi tabella 5).

Il numero di sub-faglie è importante per riprodurre al meglio la geometria della faglia e gli effetti di propagazione, perché la corner frequency di ciascuna sorgente puntiforme ed il corrispondente momento derivano dalle dimensioni delle celle. Si noti che gli accelerogrammi simulati attraverso FINSIM non corrispondono ad una specifica componente ma rappresentano entrambe le componenti orizzontali delle onde di taglio. Il programma genera un accelerogramma sintetico al bedrock, quindi eventuali effetti di sito non sono stati modellati.

Ognuna delle due sorgenti rappresentate in figura 6 è stata suddivisa in celle quadrate di dimensioni pari a 1.2 x 1.2 km. I parametri di sorgente ed i parametri geofisici inseriti nel programma (riassunti in tabella 5) sono stati ricavati dalla letteratura disponibile e rappresentano valori medi per l'area di studio (Berardi et al., 2001). L'attenuazione geometrica varia come $1/R$, mentre quella anelastica $Q(f)$ è pari a $100f$ (Rovelli et al., 1988); la densità della crosta è di 2.9 g/cm^3 (Castro et al., 1999) e la velocità delle onde di taglio è di 3.2 km/sec (Berardi et al., 2001), mentre il parametro di stress è uguale a 50 bars come suggerito dagli stessi Autori del programma.

Parametri del modello	Sorgente 1	Sorgente 2
Strike [°]	133	124
Dip [°]	45	45
Profondità [km]	2	2
Dimensione delle sorgenti [km]	9.57 x 9.89	11 x 10.69
Magnitudo [Mw]	5.8	5.9
Dimensione delle subfaglie [km]	1.2 x 1.2	1.2 x 1.2
Numero di subfaglie sommate	63	94
Velocità delle onde di taglio, β [km/sec]	3.2	3.2
Velocità di rottura [km/sec]	0.8β	0.8β
Densità crostale [g/cm ³]	2.9	2.9
Parametro di stress [bars]	50	50
Attenuazione anelastica [Q(f)]	$100f$	$100f$
Attenuazione geometrica	$1/R$	$1/R$
Frequenza d'angolo delle subfaglie [Hz]	1.13	1.14
Rise Time delle subfaglie	0.5	0.5
Distribuzione dello slip	random	random

Tabella 5 La tabella elenca i parametri della sorgente e del mezzo utilizzati per generare gli accelerogrammi sintetici a Città di Castello, con il codice di calcolo FINSIM.

Non essendo disponibili informazioni specifiche riguardo alla distribuzione dello slip medio sul piano di faglia, la simulazione è stata fatta adottando uno *slip random*: attraverso questa opzione il programma attribuisce automaticamente a ciascuna sub-faglia un valore di slip casuale, ma calibrato in modo da conservare la magnitudo momento del terremoto. Come dimostrato da Berardi et al. (2001) in assenza di un

modello accurato di distribuzione dello slip, l'uso dello *slip random* consente di ottenere buone approssimazioni dello scuotimento del terreno.

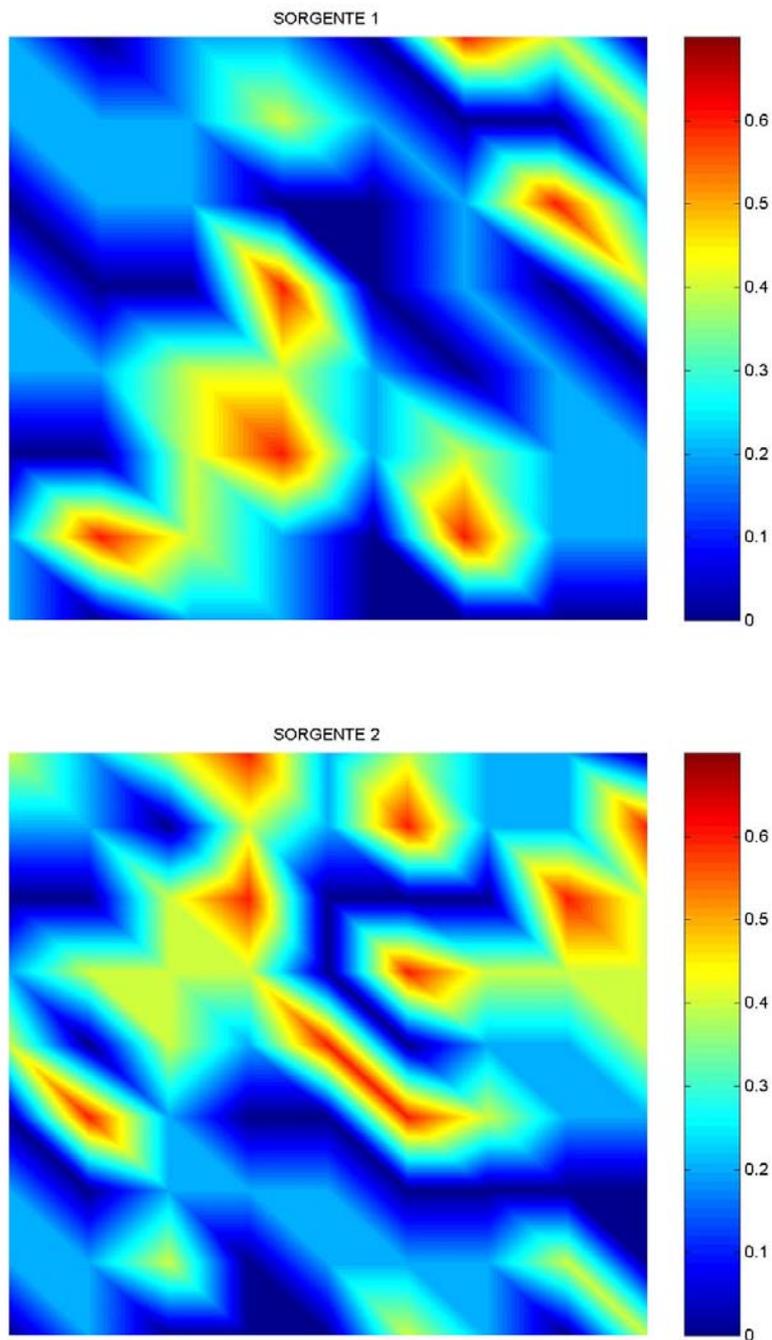


Figura 11 L'immagine in alto mostra la distribuzione dello slip (in metri) sul piano di faglia usando l'ipotesi di *slip random* per la sorgente 1, mentre in basso è rappresentata la diversa distribuzione che si ottiene per la sorgente 2.

Un confronto tra le diverse distribuzioni dello *slip random* che si ottengono per le due sorgenti è mostrato in figura 11: la distribuzione dello slip è simile, anche se la sorgente 2 presenta valori più alti rispetto alla sorgente 1 ed anche un maggior numero di sub-faglie attivate (94 contro 63, come si vede in tabella 5). I valori della corner frequency e del rise time risultanti dalla simulazione sono, rispettivamente uguali a 1.13 Hz e 0.5 sec per la sorgente 1 e 1.14 Hz e 0.5 sec per la sorgente 2.

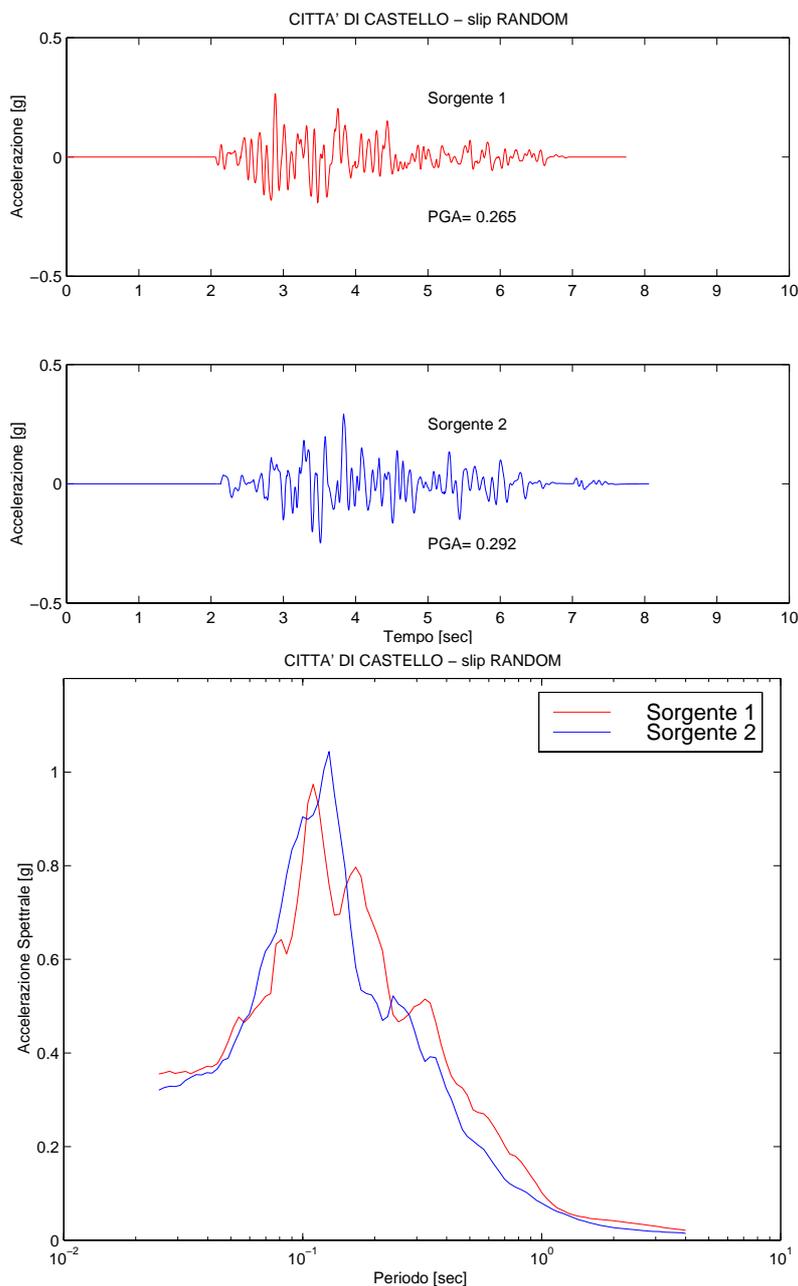


Figura 12 Nella parte alta della figura sono rappresentati gli accelerogrammi sintetici, mentre in basso sono visualizzate le accelerazioni spettrali in funzione del periodo per le due sorgenti di figura 6. Entrambe le simulazioni si riferiscono al sito di Città di Castello e sono state ottenute usando il programma FINSIM con i valori della tabella 5.

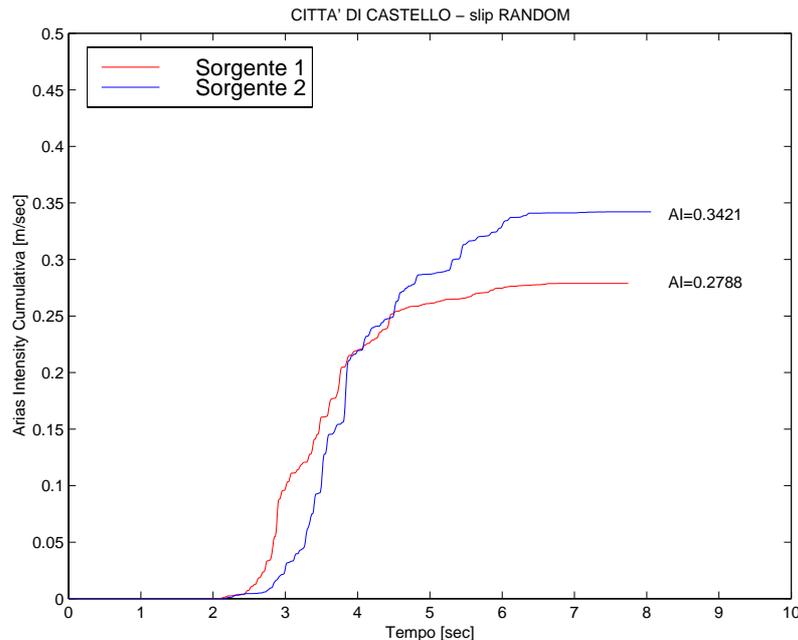


Figura 13 La figura presenta il confronto tra le curve cumulative di Arias Intensity calcolate a partire dagli accelerogrammi sintetici generati per le due sorgenti. Il valore di Intensità di Arias corrispondente a ciascuna curva è indicato a lato.

In figura 12 sono rappresentati gli accelerogrammi sintetici e gli spettri di risposta PSA (5% damping) ottenuti dalle simulazioni. L'analisi ed il confronto degli accelerogrammi di riferimento stimati in modo stocastico, mostra in modo chiaro che la sorgente 2 produrrebbe dei valori di picco di accelerazioni più elevati (0.292g) su Città di Castello, rispetto alla sorgente 1 (0.265g). Questa osservazione è confermata dalla figura 13, che mostra l'andamento del rilascio energetico in funzione del tempo tramite le curve cumulative dell'Intensità di Arias. Si nota che la sorgente 2 ha un maggiore contenuto energetico rispetto alla sorgente 1.

La sorgente 2 risulta essere la più pericolosa per due motivi: il primo è che, come si vede dalla figura 6, è la più vicina a Città di Castello, ed il secondo è che l'evento modellato ha un valore di magnitudo momento più elevato ($M_w=5.9$, contro $M_w=5.8$ della sorgente 1).

Una analisi parametrica è stata effettuata per misurare il range di variabilità della stima stocastica del moto di riferimento in funzione dell'incertezza di alcuni parametri usati nel modello stesso.

Le prove sono state fatte solo sulla sorgente 1, della quale si è scelto di non modificare né la giacitura e le dimensioni perché sono state ricavate da informazioni geologiche e sismologiche, come descritto nella sezione 1.1 di questo rapporto, né la magnitudo momento perché è legata in modo diretto alle dimensioni della sorgente. Le prove hanno riguardato quattro importanti parametri di input, cioè la profondità della sorgente, la dimensione delle sub-faglie, i cui risultati, in termini di spettro di risposta, sono rappresentati in figura 14, il parametro di stress e l'attenuazione

anelastica, questi ultimi mostrati in figura 15. In entrambe le figure (14 e 15) lo spettro indicato in rosso corrisponde alla curva spettrale relativa alla sorgente 1 presentata in figura 12.

Profondità della sorgente

Sono state fatte tre prove raddoppiando la profondità a partire dal dato fornito al termine dell'analisi descritta nella sezione 1.1, cioè sono state utilizzate profondità pari a 2, 4 e 8 km. Dalla figura si nota come all'aumentare della profondità lo spettro di risposta diminuisce, così come il valore di PGA, per effetto dell'aumento della distanza ipocentrale. Un'altra osservazione è che lo spettro corrispondente alla sorgente posta a 2 km di profondità (curva rossa) presenta un picco più marcato rispetto agli altri due spettri.

Dimensione delle sub-faglie

La dimensione delle sub-faglie è stata variata da 0.8x0.8 km a 1.2x1.2 km, fino a 1.4x1.4 km che equivale a suddividere la sorgente rispettivamente in 12x12, 9x9 e 8x8 celle. Si nota che più piccole sono le sub-faglie più alti sono il valore di PGA ed il picco massimo (g) raggiunto dallo spettro di risposta, infatti lo spettro di accelerazione di Fourier ad una distanza assegnata, dipende dall'inverso della radice quadrata della dimensione delle sub-faglie, secondo l'equazione:

$$a(f) = C(\Delta\sigma M_0)^{1/2} \left(\frac{yz\beta}{\pi} \right)^2 \Delta l^{-1/2} \quad (1)$$

Parametro di stress

Il parametro di stress influenza molto i valori degli spettri e dei picchi di accelerazione ed è quindi un parametro da variare con cautela; gli stessi Autori del programma suggeriscono di usare il valore standard di 50 bars o valori inferiori, tuttavia diversi articoli recentemente pubblicati riguardo all'area in esame attribuiscono a questo parametro valori molto più alti.

Come si vede dall'equazione 1, lo spettro è direttamente proporzionale alla radice quadrata del parametro di stress, quindi valori alti di stress fanno aumentare lo spettro di accelerazione. Dalla figura si nota che il parametro di stress non influenza la forma dello spettro, ma soltanto l'ampiezza.

Attenuazione anelastica

L'attenuazione anelastica $Q(f)$ misura il comportamento non perfettamente elastico del mezzo attraverso il quale viaggia l'onda. Tre diverse equazioni sono state sperimentate: $Q = 23f^{0.93}$ derivata da Castro et al. (1999), $Q = 100f^1$ come proposto da Rovelli et al. (1988) e $Q = 130f^{0.10}$ secondo Malagnini and Herrmann (2000).

I risultati sono sostanzialmente coincidenti per le curve di Castro et al. (1999) e Malagnini and Herrmann (2000), mentre usando la relazione di Rovelli et al. (1988) si ottiene uno spettro dalla forma uguale ma con valori di accelerazione leggermente più alti.

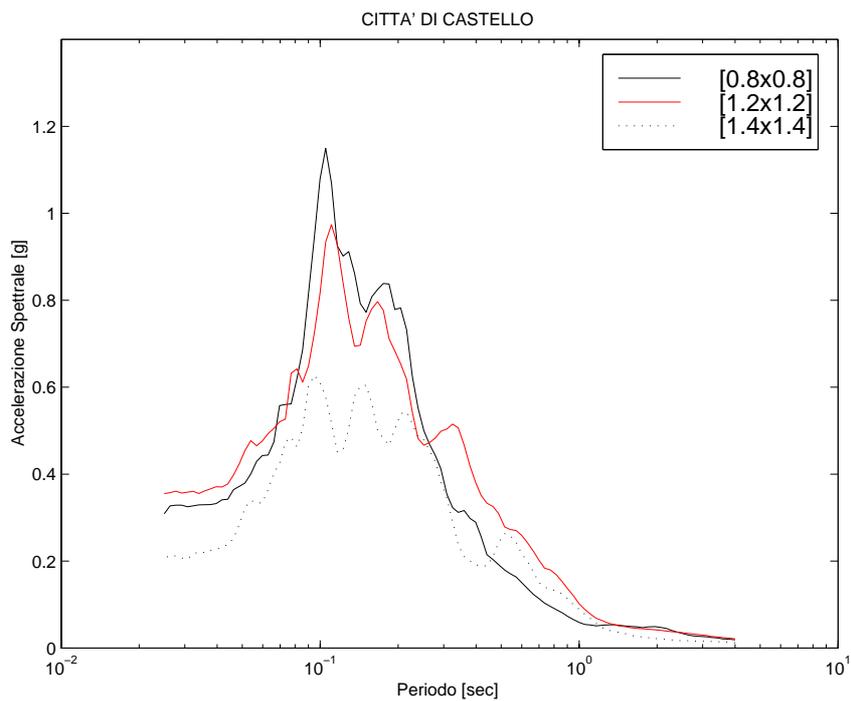
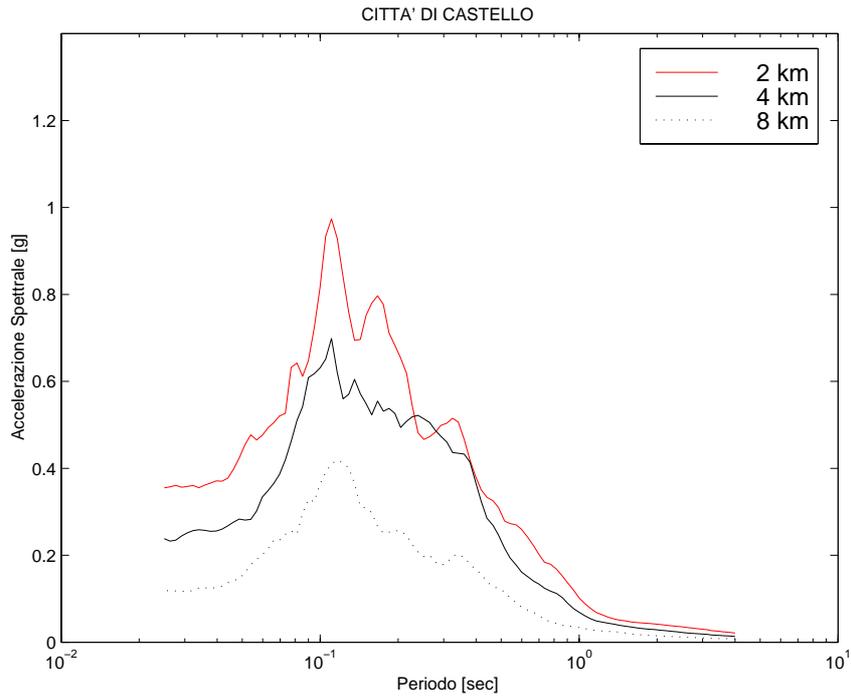


Figura 14 La figura mostra alcuni risultati delle prove parametriche effettuate sulla sorgente 1. Nell'immagine in alto sono presentati gli spettri di risposta che si ottengono al variare della profondità del margine superiore della sorgente. Nella parte inferiore della figura sono mostrati i risultati ottenuti variando la dimensione delle sub-faglie. La curva rossa corrisponde allo spettro in figura 12, relativo alla sorgente 1.

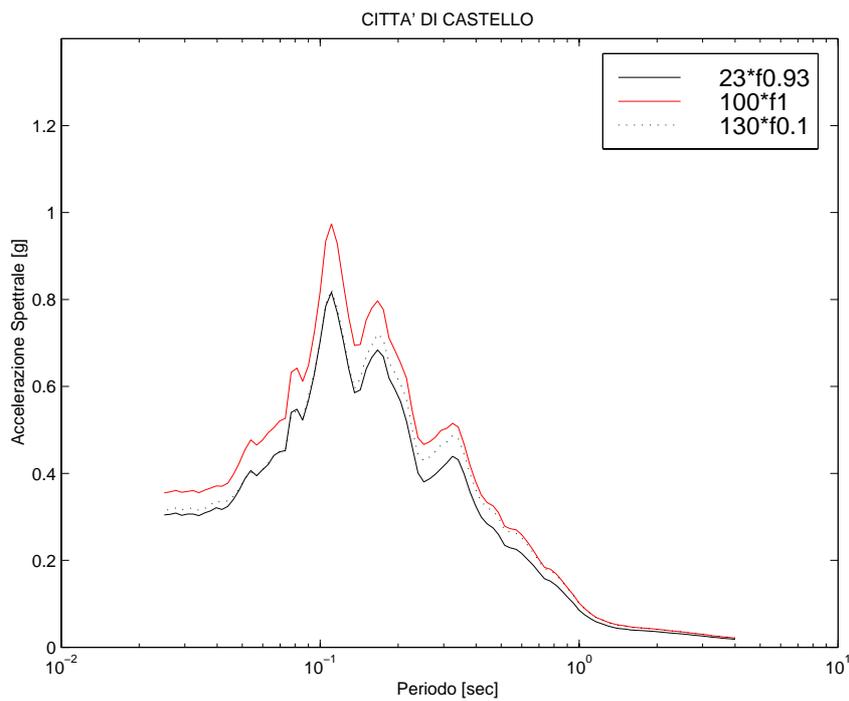
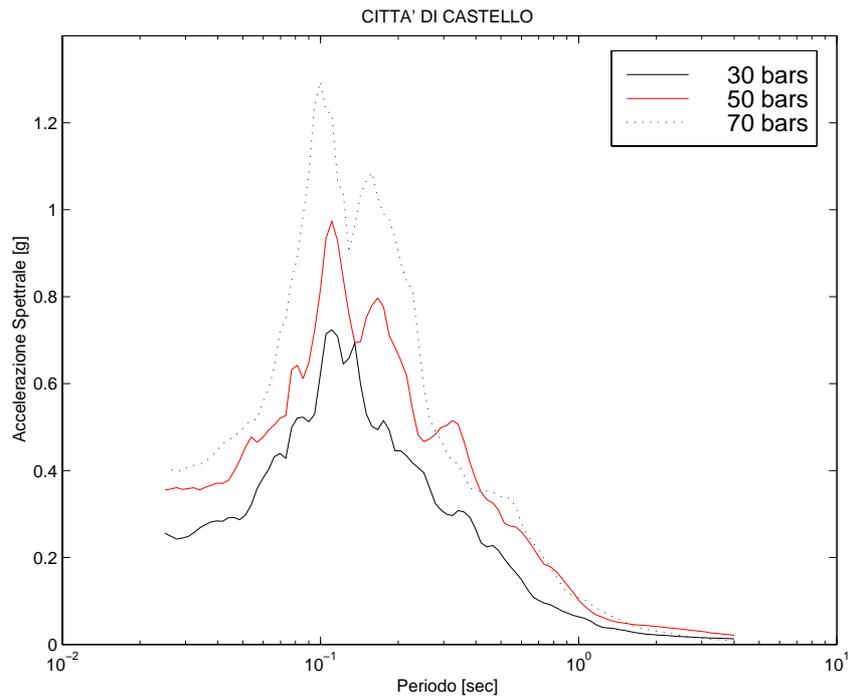


Figura 15 La figura mostra i risultati delle rimanenti prove parametriche effettuate sulla sorgente 1. Nell'immagine in alto è stato variato il parametro di stress, mentre l'immagine in basso mostra i risultati ottenuti usando diversi modelli di attenuazione anelastica. La curva rossa corrisponde allo spettro in figura 12, relativo alla sorgente 1.

In tabella 6 sono riassunti i valori di accelerazione di picco, PGA, corrispondenti alle prove effettuate variando la profondità della sorgente, la dimensione delle sub-faglie,

il parametro di stress e la legge di attenuazione anelastica; gli stessi dati sono visualizzati in figura 16.

Profondità della sorgente	2	4	8
	0.265g	0.221g	0.110g
Dimensione sub-faglie	0.8 x 0.8	1.2 x 1.2	1.4 x 1.4
	0.292g	0.265g	0.200g
Parametro di stress	30	50	70
	0.231g	0.265g	0.380g
Attenuazione anelastica	$23f^{0.23}$	$100f^1$	$130f^{0.10}$
	0.232g	0.265g	0.232g

Tabella 6 Tabella riassuntiva dei valori di picco di accelerazione (in g) ottenuti nel corso delle prove parametriche.

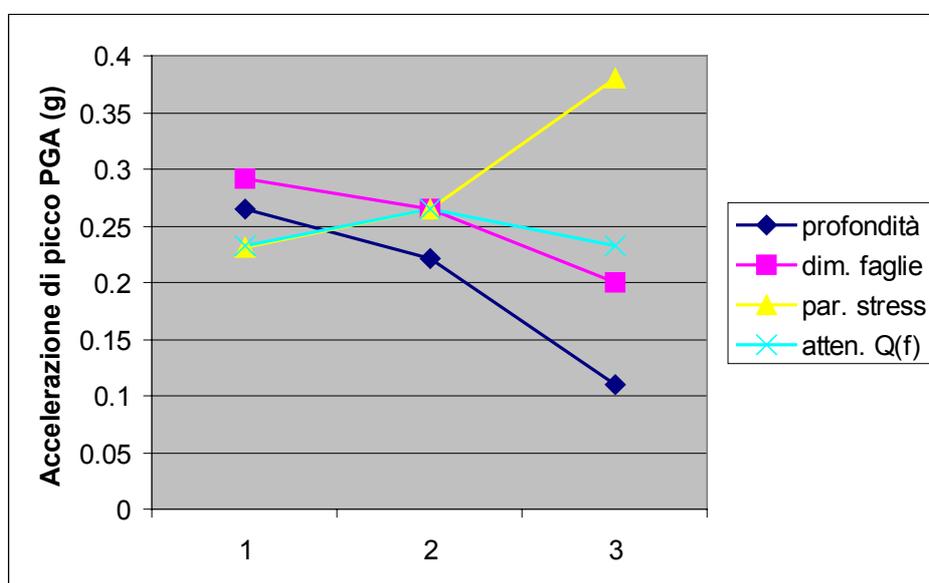


Figura 16 La figura mostra le variazioni del picco di accelerazione in funzione dei parametri selezionati per ciascuna prova effettuata.

Dalla figura 16 si nota chiaramente come il valore di picco di accelerazione sia fortemente influenzato dalla profondità della sorgente e dal parametro di stress. Anche la dimensione delle sub-faglie è un elemento critico nella simulazione, in quanto come si è visto in precedenza (eq. 1) è direttamente legato all'ampiezza dello spettro di Fourier. Inoltre è significativo notare che le tre leggi di attenuazione anelastica utilizzate non influiscono in modo sostanziale sul picco di accelerazione.

1.3 Conclusioni

Obiettivo di questa parte dell'indagine è stata la definizione del moto sismico di riferimento che servirà come input per le elaborazioni previste dai punti successivi dell'indagine stessa. Il moto sismico di riferimento è stato calcolato, a partire dalla valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per l'area, per il sito Città di Castello e per tutte le altre 18 località analizzate in questo studio.

I risultati sono espressi in termini di accelerogrammi di riferimento valutati con:

1. un modello di tipo probabilistico;
2. un modello di tipo stocastico, solo per Città di Castello.

La generazione degli accelerogrammi di riferimento, di cui al punto 1), deriva dalle curve di accelerazione spettrale calcolate con approccio probabilistico usando il codice di calcolo SEISRISK III. Si rimarca che rispetto a recenti studi di microzonazione di altri siti, della Valle Umbra Centrale e delle Marche, effettuati in seguito all'ultimo terremoto del 26/09/1997, è stato sempre utilizzato l'approccio probabilistico attraverso l'uso del programma SEISRISK III e si è considerato un periodo di ritorno di 475 anni. La parte innovativa dello studio è stato l'uso dei tassi di sismicità derivati dall'analisi del catalogo sismico CPTI (dati denominati SET3) e l'utilizzo delle leggi di attenuazione di Sabetta e Pugliese 1996, considerando la deviazione standard σ propria di ciascuna frequenza. Classico ma innovativo nello stesso tempo è stato quindi l'uso del programma SIMQKE1 che, con opportuni parametri, dalle curve di accelerazione spettrale genera degli accelerogrammi di riferimento, il cui spettro di risposta PSA (5% damping) riproduce e modella molto bene il dato di input (curve di accelerazione spettrale).

Per il sito Città di Castello sono stati determinati gli accelerogrammi di riferimento con un approccio di tipo stocastico. Sono presentati due risultati: uno relativo alla *sorgente 1*, strettamente correlata al terremoto del 1789, e uno da una seconda *sorgente*, molto prossima alla prima, che interessa direttamente le località della zona in esame. Una analisi parametrica è stata effettuata per valutare il range di variabilità della stima del moto di riferimento in funzione dell'incertezza di alcuni parametri usati nel modello stesso. Il valore del picco di accelerazione orizzontale PGA, usato come indicatore di variabilità, è fortemente influenzato dalla profondità della sorgente: si passa da un valore di 0.265 g, indotto dalla *sorgente 1* situata a 2 km di profondità, ad un valore di 0.11 g, che risulta se si ipotizza la sorgente ad una profondità di 8 km. La qualità degli accelerogrammi di riferimento è strettamente legata alla qualità del dato usato come input dal programma FINSIM. I risultati finali per Città di Castello danno rispettivamente un valore di accelerazione PGA di 0.265 g (*sorgente 1*) e di 0.292 g (*sorgente 2*), mentre gli spettri di risposta (vedi Fig. 12) sono sostanzialmente uguali.

I risultati delle analisi parametrica effettuata mostrano una variabilità del picco di accelerazione compresa nell'intervallo tra 0.2 - 0.38 g; i valori che si ottengono con l'uso di un modello stocastico sono ragionevoli e confrontabili con quelli ottenuti con l'approccio di tipo probabilistico.

BIBLIOGRAFIA

- Ambraseys N.N., 1995. The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 24, 467-490.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 25, 371-400.
- Barchi M., Galadini F., Lavecchia G., Messina P., Michetti A.M., Peruzza L., Pizzi A., Tondi E. e Vittori E. (a cura di), 1999. Sintesi delle conoscenze sulle faglie attive in Italia Centrale: parametrizzazione ai fini della caratterizzazione della pericolosità sismica. CNR-GNDT, Roma, 62 pp.
- Barchi M., Cardinali M., Chiraz P., Collettini C., Federico C., Guzzetti F., Magnani M.B., Minelli G., Mirabella F., Pauselli C., Pialli G., Pucci S. e Troiani E., 2000. Integrazione di dati geofisici e geologici per la caratterizzazione delle strutture sismogenetiche di Colfiorito e di Gubbio. In: Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di). *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999)*. CNR-GNDT, Roma, pp. 149-156.
- Bender B. and D.M. Perkins, 1987. SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1772, pp.48.
- Berardi R., Jiménez M.J., Zonno G. and García-Fernández M., 2001. Calibration of stochastic finite-fault ground motion simulations for the 1997 Umbria-Marche, Central Italy, earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, pp. 315-324
- Beresnev I.A. and Atkinson G.M., 1998. FINSIM - a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite fault. *Seism. Res. Lett.*, 69, 27-52.
- Boore D., 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological model of the radiated spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894.
- Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. e Valensise G., 1995. *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, ING-SGA, Bologna, 973 pp., + CD-ROM.
- Bozzano F., Tonto A., Larotonda A., Bardotti R., Boniolo G., Carducci C., Chimera G., Corsi A., Crespellani T., Daminelli R., de Franco R., Dolce M., Franceschina G., Madiati C., Maistrello M., Marcellini A., Marsan P., Milana G., Morrone A., Natale M., Nunziata C., Pagani M., Peruzza L., Pierantoni P., Ponziani F., Sica A., Simoni A., Suhadolc P., Traversa P. e Valentini G., 1999. *Nocera Umbra: elementi di Microzonazione Sismica. Progetto di Microzonazione Sismica Umbria-Marche, Rapporto N.17 GNDT/SSN*, Milano, 46 pp.
- Camassi R. e Stucchi M., 1997. NT4.1 un Catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. CNR – GNDT, Milano, 86 pp.
- Castro R.R., Monachesi G., Mucciarelli M., Trojani L. and Pacor F., 1999. P- and S-wave attenuation in the region of Marche, Italy. *Tectonophysics*, 302, 123-132.
- Castelli V., 2001. Il terremoto del 30 settembre 1789 nell'area di Città di Castello: aggiornamento delle conoscenze alla luce dei risultati delle ultime ricerche. *Rapporto tecnico, GNDT*, 37 pp.
- Cornell C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Galadini F., Meletti C. e Vittori E., 2000a. Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. In: Galadini F., Meletti C. e Rebez A. (a cura di). *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999)*. CNR-GNDT, Roma, pp. 107-136.
- Galadini F., Messina P. e Sposato A., 2000b. Tettonica quaternaria nell'Appennino centrale e caratterizzazione dell'attività di faglie nel Pleistocene superiore-Olocene. In: Galadini F., Meletti C. e Rebez A. (a cura di). *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999)*. CNR-GNDT, Roma, pp. 181-192.
- Gasparini D.A. and Vanmarcke E.H., 1976. "Simulated Earthquake Motions Compatible With Prescribed Response Spectra", Department of Civil Engineering, Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Gasperini P., Bernardini F., Valensise G. e Boschi E., 1999. Defining seismogenic sources from historical earthquake felt reports. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, pp. 94-110.
- Gruppo di Lavoro CPTI, 1999. *Catalogo parametrico dei terremoti italiani*. ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna, 92 pp.
- Guadagno F.M., Larotonda A., Cattaneo M., Chimera G., Crespellani T., Daminelli R., de Franco R., Dolce M., Franceschina G., Govoni A., Magaldi S., Marcellini A., Marsan P., Michelini A., Milana G., Natale M., Nunziata C., Pagani M., Peruzza L., Priolo E., Sica A., Sirovich L. e Valentini G., 1999. *Sellano: elementi di Microzonazione Sismica. Progetto di Microzonazione Sismica Umbria-Marche, Rapporto N.16 GNDT/SSN*, Milano, 34 pp.
- Lavecchia G., Boncio P. e Brozzetti F., 2000. Analisi delle relazioni tra sismicità e strutture tettoniche in Umbria-Marche-Abruzzo finalizzata alla realizzazione della mappa delle zone sismogenetiche. In:

- Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di). Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 79-92.
- Lavecchia G., Boncio P., Brozzetti F., Stucchi M. e Leschiutta I., 2001. New criteria for 3-D seismotectonic zoning of Central Italy. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Volume Speciale (sottomesso).
- Malagnini L. and Herrmann R.B., 2000. Ground-motion scaling in the region of the 1997 Umbria-Marche earthquake (Italy). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1041-1051.
- Meletti C., Moretti A. e Scandone P., 1993. Schema sismotettonico del segmento appenninico compreso tra il Passo della Cisa e l'alta Val Tiberina. Rapporto interno ENEL-CRIS, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, 34 pp.
- Meletti C. e Slejko D., 1999. I risultati GNDT di pericolosità sismica per l'Italia centrale. In: Peruzza L. (a cura di), Progetto MISHA. Metodi innovativi per la stima dell'hazard: applicazione all'Italia centrale. CNR-GNDT, Roma, pp.10-28.
- Meletti C., Stucchi M., Galadini F., Leschiutta I. e Scandone P., 2000. Criteri e procedure per la compilazione di un inventario speditivo delle sorgenti potenziali di terremoti distruttivi, finalizzato alla compilazione di una nuova mappa delle zone sismogenetiche per l'area italiana. In: Galadini F., Meletti C. e Rebez A. (a cura di). Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 379-397.
- Monachesi G. e Stucchi M., 1997. DOM4.1, un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. Rapporto tecnico, GNDT, Milano-Macerata, 1052 pp. + <http://emidius.itim.mi.cnr.it/DOM/home.html>
- Monachesi G., Castelli V. Coppari H., Stucchi M., Peruzza L., Franceschina G.L., Marcellini A., Pagani M. e Priolo E., 2000. Sismicità di riferimento. In: Marcellini A. e Tiberi P. (eds.), La microzonazione sismica di Fabriano. CNR, GNDT, Regione Marche e SSN, Macerata, pp. 15-61.
- Panza G.F., Vaccari F. e Cazzaro R., 1999. Deterministic seismic hazard assessment. In: F. Wenzel et al. (eds), *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 269-286.
- Peruzza L. (ed.), 1999. Progetto MISHA. Metodi innovativi per la stima dell'hazard: applicazione all'Italia Centrale. CNR-GNDT, Roma, pp. 65-80.
- Rebez A. e Slejko D., 2000. Analisi di sensibilità sulla carta di pericolosità sismica del territorio nazionale realizzata dal GNDT. In: Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di). Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 249-264.
- Rebez A. e Stucchi M., 2000. Influenza della superficie delle zone sismogenetiche sul calcolo della pericolosità sismica. In: Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di), Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 15-21.
- Rovelli A., Bonamassa O., Cocco M., Di Bona M. and Mazza S., 1988. Scaling laws and spectral parameters of the ground motion in active extensional areas in Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 530-560.
- Sabetta F. and Pugliese A., 1987. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 1491-1513.
- Sabetta F. and Pugliese A., 1996. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 337-352.
- Scandone P. e Stucchi M., 2000. La zonazione sismogenetica ZS4 come strumento per la valutazione della pericolosità sismica. In: Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di). Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 3-14.
- Slejko D., Peruzza L. and Rebez A., 1998. Seismic hazard maps of Italy. *Annali di Geofisica*, 41, 183-214.
- Stucchi M., 1999. Towards the assessment of data completeness from the "historical" point of view. ESC WG "Historical Seismology", Workshop and field-trip, Macerata (Italy), 1-5 September 1999.
- Stucchi M. e Albinì P., 2000. Quanti terremoti distruttivi abbiamo perso nell'ultimo millennio? Spunti per la definizione di un approccio storico alla valutazione della completezza. In: Galadini F., Meletti C. & Rebez A. (a cura di), Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR-GNDT, Roma, pp. 333-343.
- Stucchi M. e Rebez A., 2000. How many earthquakes have been lost? Some consequences of the seismicity rates evaluation in PSHA. Workshop on seismicity modeling in seismic hazard mapping, Polce (Slovenia), 22-24 May 2000.
- Stucchi M., Scandone P., Galadini F., Meletti C. e Rebez A., 2000. Towards a new seismogenic zonation of Italy. XXVII ESC General Assembly, SSF-1, 10-17 September 2000, Lisboa.

Wells D.L. and Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, pp. 84, 974-1002.

Zonno G. and Montaldo V., 1999. A method for creating synthetic input experimented in Italy. *Proceedings of the Joint Workshop: "Modeling a comprehensive scenario for a seismic event based on lessons from recent earthquakes in Italy and Japan"*, Milan 21-22 June 1999.