

12. ANALISI DI SENSIBILITA' ALL'INTRODUZIONE DI SORGENTI LINEARI E TRATTAMENTO TIME-DEPENDENT

Laura Peruzza

GNDT c/o OGS, Trieste

12.1 Introduzione

Verranno qui raccolti e commentati i test fatti per l'introduzione di strutture lineari e processi non poissoniani, in una stima della pericolosità sismica di tipo probabilistico. Due infatti erano gli obiettivi che si prefiggeva la UO OGS-TS1: valutare l'impatto dell'utilizzo di sorgenti lineari realistiche, nelle valutazioni probabilistiche della pericolosità, e stimare, in prima approssimazione, l'effetto della dipendenza temporale delle stime stesse, nella speranza di fornire utili linee guida per la ricerca da estendersi in futuro all'intero territorio nazionale.

Le strutture lineari utilizzate sono quelle individuate in Peruzza (1999a), da Barchi et al. (1999): per esse sono già state fatte delle considerazioni sulla parametrizzazione energetico-geometrica in un altro lavoro (Peruzza, 1999b). Le sorgenti ricavate da altre analisi (in particolare quelle ottenute tramite la modellazione dell'intensità macrosismica) non sono state utilizzate, per il diverso grado di conoscenza loro associato; si rinvia alle considerazioni riportate nelle conclusioni generali del progetto MISHA. Nelle elaborazioni che seguiranno è stata presa come geometria della sorgente da utilizzare nei calcoli la traccia semplificata corrispondente all'emersione superficiale della struttura attiva. Ciò è corretto nel caso di strutture grossomodo verticali, ma può non esserlo nello specifico di strutture ad inclinazione variabile; in questo caso vi sono diverse possibili geometrie utilizzabili, che vanno dalla individuazione di un segmento decentrato nel senso dell'immersione della struttura (a seconda della profondità ed immersione imputati alla sorgente), alla definizione di un areale rettangolare, proiezione in superficie del piano di faglia, all'uso infine della completa geometria tridimensionale. Le varie opzioni possibili devono essere coerenti col grado di conoscenza, e con il parametro estimatore dello scuotimento utilizzato. Per omogeneità con le analisi eseguite in passato (Slejko et al., 1998), le prove di sensibilità qui presentate utilizzeranno l'accelerazione di picco PGA, definita col decadimento proposto da Ambraseys et al. (1996), per le condizioni di roccia; le relazioni di attenuazione di tale parametro prevedono che lo scuotimento sia defi-

Contributo dell'UO OGS-TS1

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/c,
34010, Sgonico, Trieste

Responsabile: L. Peruzza

Contratto n. 98.03227.PF54 (Michelini resp.)

e-mail 1° autore: lperuzza@ogs.trieste.it

nito in funzione della distanza minima dalla faglia responsabile, generalmente calcolata dall'espressione superficiale reale o presunta. Per questo motivo si ritiene adeguata la semplificazione geometrica adottata; essa rappresenta una prima approssimazione al problema, viste anche le semplificazioni e le incertezze accettate nella parametrizzazione delle strutture.

Per quanto riguarda la dipendenza temporale della previsione, la memoria viene introdotta nell'ipotesi più semplificata di un processo renewal, che conserva cioè la memoria dell'ultimo evento senza imporre alcuna dipendenza energetica sull'evento stesso.

I risultati verranno mappati sulla medesima griglia di punti utilizzata per i risultati di pericolosità tradizionali; essi sono rappresentati per confronto in Fig. 1.

12.2 Sismicità osservata nell'area

Prima di valutare l'impatto delle sorgenti sismogenetiche individuate su base geologica, è opportuno partire con qualche considerazione generale sulla sismicità regionale osservata direttamente, in periodo storico e strumentale.

Tradizionalmente, la valutazione quantitativa dei processi sismogenetici passa attraverso un catalogo dei terremoti; per decenni, l'estensione temporale e la qualità del catalogo sismico per l'Italia sono state prese come garanzia sufficiente per individuare e parametrizzare le sorgenti sismogenetiche, e solo negli ultimi anni questo assioma è entrato in discussione, essenzialmente in relazione ai risultati di indagini paleosismologiche (vedi ad es. Pantosti et al., 1996).

In questo paragrafo si cercherà di caratterizzare il tasso di sismicità regionale, ed il possibile modello di occorrenza dei terremoti nell'area, basando la stima sui soli dati sismologici.

12.2.1 Il catalogo

Il catalogo utilizzato nell'analisi è NT41.1 (Camassi e Stucchi, 1997), disponibile sul sito web del GNDT con l'aggiornamento al 1992 dal marzo 1998.

E' questo il catalogo che, con qualche piccola variazione, è stato utilizzato per le cosiddette stime di pericolosità sismica del territorio nazionale di seconda generazione (Slejko et al., 1998; Romeo e Pugliese, 1998; Faccioli e Petrini, 1996; Gruppo di Lavoro, 1999; Albarello et al., 1999). E' questo il catalogo inoltre che ha guidato la definizione delle sorgenti sismogenetiche (SZ4, Scandone, 1997) utilizzate per l'approccio alla Cornell, rappresentate dai poligoni di Fig. 1.

Il catalogo NT41.1 nasce nella logica di uno strumento finalizzato all'hazard tradizionale, che utilizza una serie di terremoti considerati eventi indipendenti tra di loro: in letteratura, questa condizione di indipendenza viene generalmente ribadita come necessità teorica, ma raramente è rispettata nella pratica. Al contrario si ritiene essenziale uti-

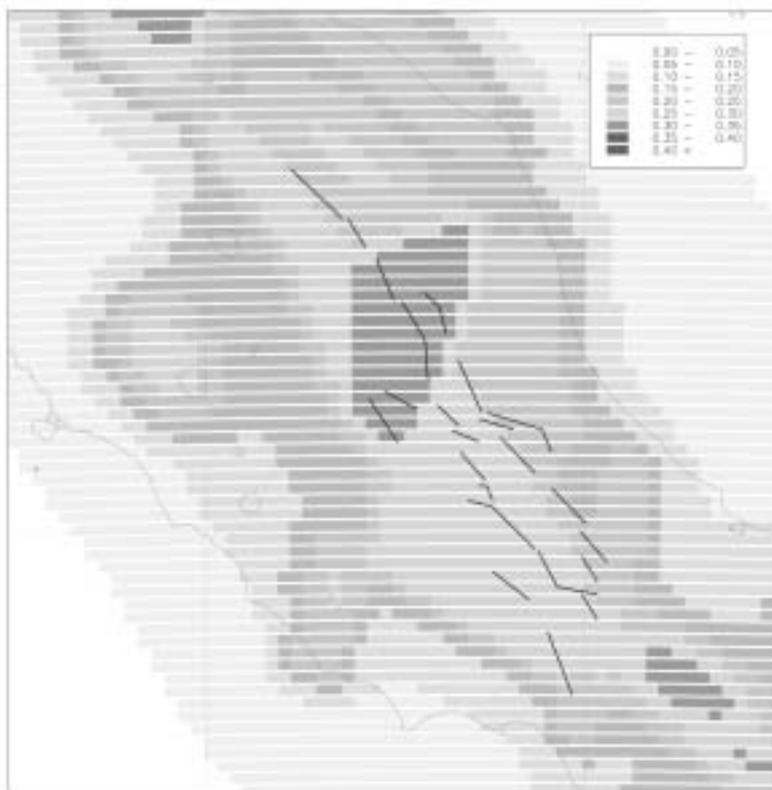


Fig. 1 - PGA (in g) non superata al 90% in 50 anni: sorgenti estese, parametrizzate in Slejko et al., 1998; relazione di attenuazione di Ambraseys et al. (1996) riferita a roccia, con deviazione standard. A tratto continuo vengono riportate le strutture individuate in Barchi et al., 1999 (la figura a colori è riportata in Appendice a pag. 172).

lizzare un catalogo comprensivo di tutti gli eventi per le stime dipendenti dal tempo, come quelle che si prefigge questo progetto.

La decisione di utilizzare NT41.1 in modo esclusivo in questa fase di valutazione della pericolosità sismica con nuovi dati e tecniche innovative si giustifica sia con la necessità di uniformare il più possibile l'informazione sismologica con quella già utilizzata (da un lato per enfatizzare il contributo delle nuove ipotesi sulle sorgenti lineari, e dall'altro per riconoscere l'impatto della modificata metodologia), sia col fatto che l'obiettivo di un catalogo sismico "con repliche" per l'Italia centrale non era realisticamente perseguibile, nel respiro annuale in cui è articolato il progetto MISHA.

Vi sono anche delle ulteriori considerazioni, derivate dai criteri guida di NT41.1 e dalla disponibilità ed omogeneità delle informazioni reperibili, che ridimensionano l'impatto atteso nella valutazione dell'hazard dall'uso di un eventuale catalogo con repliche. Alcuni eventi "dipendenti" significativi, o sufficientemente documentati, sono stati reintrodotti in NT41.1. L'operazione di declustering del catalogo progenitore (Postpischl, 1985) è stata infatti rivista manualmente per consentire il rientro in catalogo di alcuni eventi giudicati "efficaci" ai fini del danneggiamento, o rappresentativi di una rottura

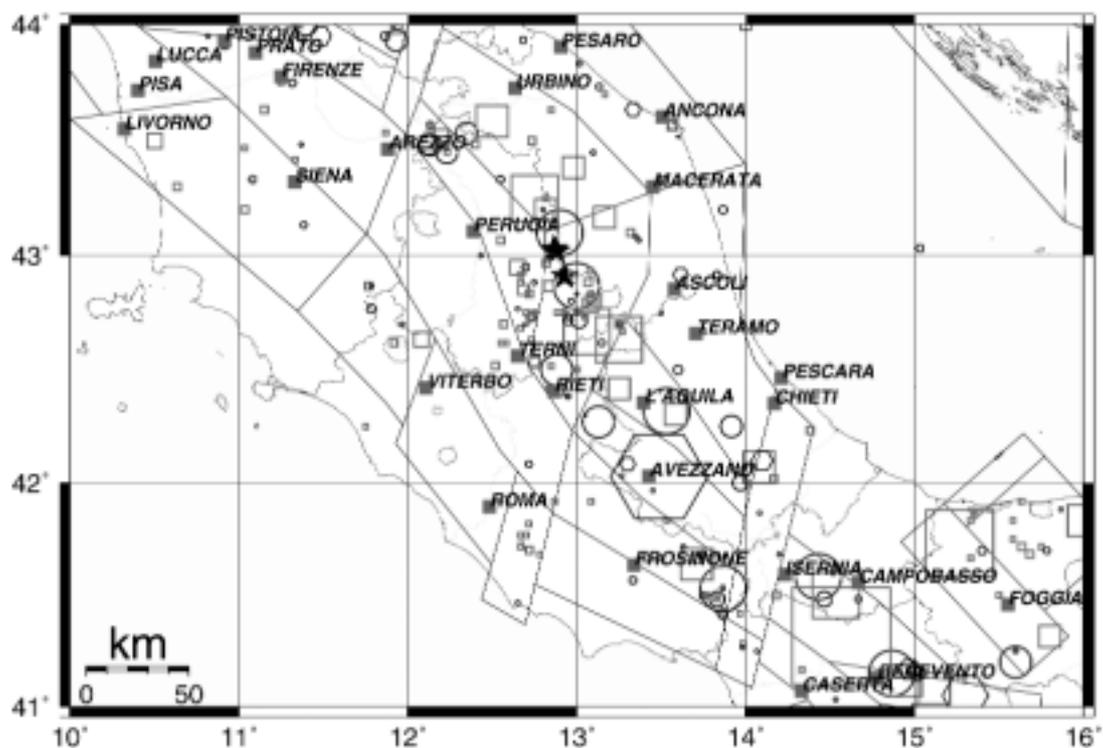


Fig. 2 - Distribuzione degli epicentri con $M \geq 5.0$, tratti da NT41.1 (Camassi e Stucchi, 1997) nel settore investigato. La grandezza del simbolo è proporzionale alla magnitudo, il simbolo utilizzato fa riferimento alla data dell'evento (cerchi per eventi fino al 1600, quadrati dal 1601 al 1899, esagoni dal 1900). A tratto sottile la zonazione ZS4.0 (Scandone, 1997); le stelle indicano i tre eventi principali della sequenza umbro-marchigiana del 1997-1998.

complessa (si pensi alla sequenza del 1783 in Calabria, o alla scossa di settembre 1976 in Friuli), in qualche caso parametrizzati con epicentri multipli, come ad es. il 1349 e il 1456 (entrambi nell'area qui investigata).

Un catalogo con repliche deve parametrizzare omogeneamente tutti gli eventi. Il problema si pone in modo particolare per le sequenze sismiche del passato, in quanto non vi sono ad oggi strumenti robusti per parametrizzare le sorgenti da dati macrosismici in riferimento alle repliche: la sequenza di Umbria-Marche del 1997-98 è stata probabilmente una palestra importante sul problema degli eventi multipli, sia nell'aspetto ingegneristico (progressivo degrado delle caratteristiche di resistenza dei manufatti), sia su quello più strettamente sismologico; ma la formalizzazione delle incertezze è ancora lontana. Per quanto riguarda le registrazioni strumentali, esse sono di buona qualità (incertezza nella localizzazione entro qualche km) e complete, in Italia, per un intervallo di tempo decisamente limitato, e a tutt'oggi persistono sensibili disomogeneità nella copertura e nella stima della magnitudo dei terremoti (vedi Gasperini e Monachesi, 1998).

Il catalogo NT41.1 privilegia l'omogeneità interna nei criteri di parametrizzazione dei terremoti, e rappresenta anche eventi non strettamente indipendenti, purchè significativi e sufficientemente noti; rappresenta pertanto un buon punto di partenza anche per le

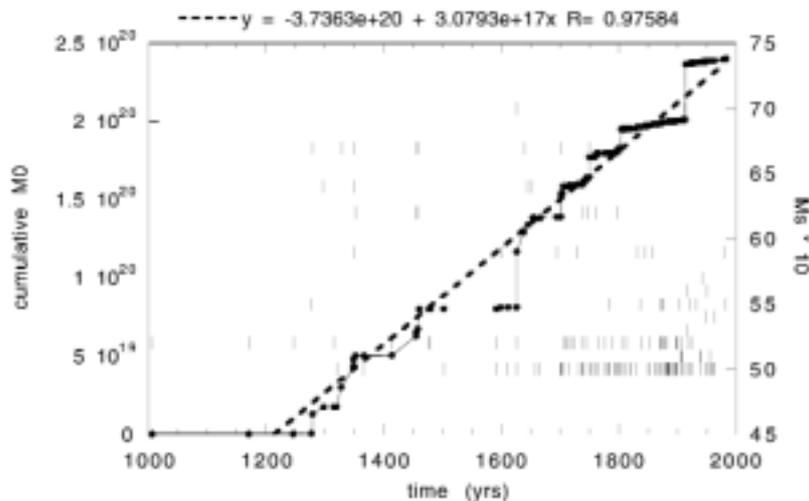


Fig. 3 - Distribuzione temporale degli eventi estratti dal catalogo sismico nell'area investigata (vedi Fig. 1): cerchi pieni uniti dalla spezzata indicano il grafico di rilascio cumulativo di momento sismico, in riferimento all'asse delle ordinate sulla sinistra. A tratteggio, la retta di interpolazione ottenuta sull'intero catalogo.

analisi di hazard time-dependent.

La soglia inferiore di magnitudo dichiarata in NT41.1 è 4.0. La test-area individuata è sensibilmente sismica, e questo rende modesto il contributo all'hazard di eventi minori; analogamente minimo è l'impatto di questi ultimi, al fine del bilanciamento energetico complessivo. L'analisi che segue sarà focalizzata sugli eventi medio-forti ($M_s \geq 5.0$), scelta fra l'altro adottata anche da altri recentissimi studi (ad esempio, vedi Field et al., 1999). Si risolvono in questo modo anche eventuali problemi di "incompletezza" per i terremoti al limite della magnitudo investigata nel catalogo stesso. Gli eventi estratti dal catalogo NT41.1 nell'area rettangolare delimitata dai vertici A (43.500, 10.0); B (41.500, 16.000) per $M \geq 5.0$ sono 176; in Fig. 2 è riportata la distribuzione degli epicentri. La test-area è stata centrata sull'area danneggiata dai terremoti di Umbria-Marche del 1997-98, delimitando la copertura areale delle strutture responsabili dei terremoti maggiori in Italia centrale emerse nella fase di consenso (Barchi et al., 1999), e adottando l'ipotesi di lavoro (supportata dalla letteratura esistente, vedi ad es. Westaway, 1992) che nel settore delimitato, longitudinalmente alla catena appenninica, non si verificano significative variazioni delle velocità di spostamento, nè si assiste a sensibili disparità nelle modalità del rilascio energetico (profondità coinvolte, reologia etc.).

In Fig. 3 sono rappresentati lungo l'asse del tempo gli eventi estratti da NT41.1 e mappati in Fig. 2. Ad essi viene sovrapposta la curva di rilascio cumulativo di momento sismico, calcolato tramite la conversione $M_s \rightarrow M_o$ di Hanks and Kanamori (1979), ampiamente utilizzata dalla letteratura mondiale.

Il grafico serve per introdurre lo spinoso problema della completezza di un catalogo sismico in funzione della soglia di magnitudo considerata, problema non aggirabile nel momento in cui ci si prefigge una stima del tasso medio annuo di terremoti.

Tab. 1 - Coefficienti dell'interpolazione lineare della curva di rilascio cumulativo di momento sismico, al variare dell'anno iniziale dell'analisi; con R si indica il coefficiente di correlazione. Il parametro m (pendenza della retta ottenuta) rappresenta il tasso di momento sismico riferito all'area.

Y=mX+q	m	q	R
dal 1000	$3.0793 \cdot 10^{17}$	$-3.7363 \cdot 10^{20}$	0.97584
dal 1600	$3.4150 \cdot 10^{17}$	$-4.3487 \cdot 10^{20}$	0.94639
dal 1700	$3.0889 \cdot 10^{17}$	$-3.7373 \cdot 10^{20}$	0.93757
dal 1895	$5.8245 \cdot 10^{17}$	$-9.0004 \cdot 10^{20}$	0.80737

12.2.2 La completezza

Stazionarietà e completezza, e la conseguente scelta del periodo di riferimento per quantificare l'attività sismica di un'area/struttura sono una delle "querelle" sismologiche destinate a durare nel tempo; le analisi più recenti (ad es. Albarello et al., 1999) stanno introducendo nei tassi di sismicità dei fattori di pesatura in funzione della presunta completezza, procedimento che dovrebbe correggere le stime legate a campioni spazialmente limitati (piccole sorgenti sismogenetiche, storie sismiche di sito), dove l'esiguo numero di eventi riconosciuti rende problematica la definizione stessa di "stazionarietà". Il problema è meno sensibile quando l'analisi viene riferita ad un'area sufficientemente estesa, quale quella qui presa come campione, e ci si riferisce ad una soglia energetica già significativa. Privilegiando la filosofia che non vuole stabilire la completezza di un set di dati in modo dipendente dal campione stesso, le soglie di completezza adottate per la regione sono le seguenti:

- 1) dall'inizio del catalogo (anno 1000) per $M_s \geq 6.4$;
- 2) dal 1600 per $5.6 \leq M_s < 6.4$ ($M_s=6.3$ non rappresentata);
- 3) dal 1895 per $M_s < 5.6$.

La scelta trova riscontro dall'andamento del grafico del rilascio energetico, semplice ma efficace metodo per qualificare la completezza di un set di dati sismologici; la soglia per le magnitudo minori viene ancorata alla data di fondazione della Società Sismologica Italiana, con la quale si assicura la completezza delle notizie dei terremoti fino alla II guerra mondiale. In Tab. 1 sono riportati i valori del fit lineare alla curva del momento sismico cumulativo al variare dell'anno iniziale dell'analisi.

La pendenza resta grossomodo invariata dal 1000 in poi, con un lieve incremento a partire dal 1600, ed un più marcato aumento nell'ultimo secolo: questo è imputabile all'accadimento del terremoto massimo per l'area (Fucino, 1915) il cui impatto energetico è molto sensibile. Contrariamente alla logica, la frequenza degli eventi di bassa magnitudo sembra diminuire nell'ultimo mezzo secolo: è possibile che dopo la seconda guerra mondiale non sia stata garantita la completezza delle informazioni fornita dalla Società Sismologica Italiana nell'anteguerra, fino all'avvento di un capillare monitoraggio strumentale del territorio nazionale (fine degli anni '70); parimenti può trattarsi di un problema di sovrastima della magnitudo da dati macrosismici, o ancora di fluttuazioni dell'attività legate ai cicli sismici (vedi l'analisi proposta da Rotondi, 1999).

Tab. 2 - Calcolo del tasso annuo di momento sismico per l'area.

	ΣM_0 (Nm)	Δt (anni)	tasso annuo di M_0
dal 1000	$2.4037 \cdot 10^{20}$	1000 yr	$2.4 \cdot 10^{17}$
dal 1400	$1.9001 \cdot 10^{20}$	600 yr	$3.2 \cdot 10^{17}$
dal 1600	$1.5917 \cdot 10^{20}$	400 yr	$4.0 \cdot 10^{17}$
dal 1700	$1.0116 \cdot 10^{20}$	300 yr	$3.4 \cdot 10^{17}$
dal 1895	$0.4023 \cdot 10^{20}$	100 yr	$4.0 \cdot 10^{17}$

12.2.3 Momento sismico

La stima del tasso di momento sismico M_0 complessivo dal catalogo dei terremoti in Italia centrale può essere dedotta dal coefficiente angolare della retta di regressione sul rilascio di momento sismico (Tab. 1), o dal rapporto fra il valore di M_0 cumulativo ed il tempo cui si riferisce (Tab. 2). Il tasso annuo di momento sismico varia fra 2 e $6 \cdot 10^{17}$ Nm/yr (seconda colonna di Tab. 1, e ultima di Tab. 2), con il valore che pare più attendibile attorno a $3-4 \cdot 10^{17}$; tali stime collocano questo settore dell'Italia nell'ambito di un fenomeno di modesta entità, se confrontato ad esempio con analoghe stime fornite per la California ($8-12 \cdot 10^{18}$, Field et al., 1999) o nella regione anatolica.

Una considerazione speditiva sulla velocità di estensione causata dal solo rilascio sismico documentato in periodo storico può essere ricavata come proposto da Westaway (1992); attribuendo il momento sismico cumulato dal 1600 in poi ad una fascia di estensione variabile, otteniamo valori di velocità di spostamento che variano tra 2.7 mm/yr per una lunghezza pari a 250 km, e 1.9 mm/yr nel caso di 350 km; attribuendo il tasso di deformazione tettonica a strutture distensive di media inclinazione, si ottengono velocità di estensione inferiori del 20-40%, a conferma dell'ordine di grandezza atteso per il fenomeno.

Per le considerazioni sulla validità della conversione $M_S \rightarrow M_0$ si rinvia invece al contributo di Augliera et al. (1999); come concludono gli autori, i dati raccolti durante la sequenza sismica di Umbria-Marche, che si riferiscono sicuramente a terremoti nel contesto distensivo dell'Appennino centrale, non sembrano invocare leggi di scala particolari: la conversione $M_L \rightarrow M_0$ tarata sugli spettri di terremoti di $M < 5.0$ della sequenza sismica non è molto dissimile da quanto proposto da Hanks and Kanamori; appare pertanto più affidabile quest'ultima, poichè non obbliga ad una estrapolazione della relazione ottenuta alle alte M.

L'intervallo $2-6 \cdot 10^{17}$ Nm/yr è comunque una stima del tasso annuo di momento sismico da catalogo dei terremoti che tollera una certa incertezza relativa alle relazioni di conversione utilizzabili.

12.2.4 Tasso annuo di terremoti

Il tasso annuo di terremoti viene calcolato in riferimento ai tre periodi di comple-

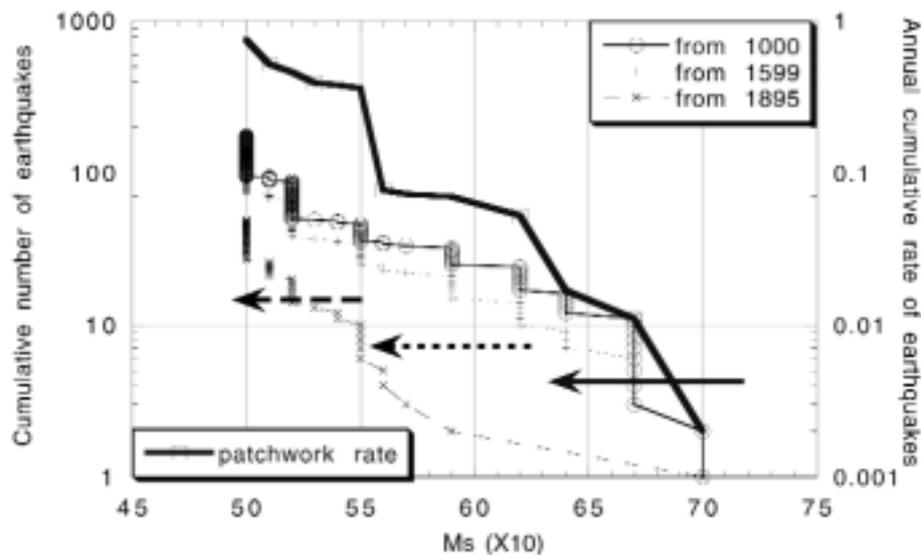


Fig. 4 - Tasso di terremoti da catalogo: con tratto sottile si indica il numero cumulativo annuo di eventi (asse y di sinistra), relativo a diverse finestre temporali analizzate; con tratto grosso il tasso cumulativo annuo calcolato in riferimento alle tre finestre di completezza dei dati indicate con le frecce.

tezza sopra definiti: in Fig. 4 sono rappresentate le curve del numero cumulativo di eventi nelle tre finestre temporali analizzate (asse y sulla sinistra), mentre col tratto ingrossato viene rappresentato il tasso cumulativo annuo (ordinate sulla destra), ottenuto dalla opportuna combinazione delle diverse finestre temporali.

Questo “patchwork rate” rappresenta la stima complessiva per l’area in analisi.

In Fig. 5 il tasso di sismicità ottenuto in Fig. 4 è stato interpolato dalla tradizionale relazione G-R; per confronto sono riportati anche i livelli di sismicità relativi alla California. Sempre in Fig. 5 è graficata la relazione frequenza-magnitudo ricavata dai dati della rete temporanea (Augliera et al., 1999) installata a seguito dei terremoti del settembre 1997; è impressionante notare la stabilità delle relazioni G-R ottenute nella regione italiana analizzata a partire da insiemi di dati così diversi tra loro.

La stabilità della relazione frequenza-magnitudo E’ LA GIUSTIFICAZIONE CON LA QUALE E’ PLAUSIBILE APPLICARE IL MEDESIMO VALORE DI b ANCHE ALLE SORGENTI LINEARI IDENTIFICATE SU BASE GEOLOGICA; PER ESSE INFATTI E’ IMPOSSIBILE GIUNGERE AD UNA QUANTIFICAZIONE INDIVIDUALE DELLA ATTIVITA’ DAI DATI SPERIMENTALI.

12.2.5 Magnitudo massima attesa nell’area

Il tasso cumulativo annuo di terremoti ricavato nel paragrafo precedente è stato utilizzato anche per una prima valutazione della massima magnitudo attesa: fra le diverse relazioni di occorrenza dei terremoti (vedi Anderson and Luco, 1983, per una rassegna) sono stati qui prese in considerazione due possibili casi limite: una distribuzione G-R troncata, e una distribuzione gaussiana che rappresenti l’ipotesi di terremoto caratteristico. Le due formulazioni possono essere anche opportunamente combinate (vedi Fig. 6,

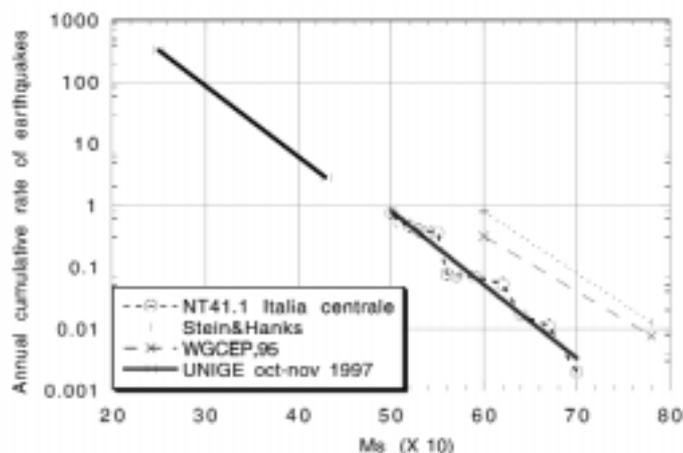


Fig. 5 - Tasso annuo di terremoti a confronto: a tratteggio le stime relative alla California, con tratto ingrossato quelle relative all'Italia Centrale.

tratta da Field et al., 1999), conferendo un aspetto chiaramente riconoscibile ai grafici frequenza-magnitudo. Bisogna comunque considerare che tanto più estesa sarà l'area analizzata, tanto più sarà favorita una distribuzione G-R, possibile somma anche di diversi comportamenti caratteristici.

Risolvendo in maniera esplicita le equazioni che definiscono la G-R troncata, e il relativo tasso complessivo di momento sismico (vedi ancora Field et al., 1999, per la spiegazione) si ottiene una magnitudo massima $M_2 = 6.94$, qualora il tasso di momento sismico venga posto pari a $3 \cdot 10^{17}$, e $M_2 = 7.26$ per $M_0 = 4 \cdot 10^{17}$ (vedi Fig. 6).

Il secondo valore sembra più adeguato, anche considerando che la massima magnitudo osservata per l'area (terremoto di Avezzano, del 1915, in NT41.1 $M_s = 7.0$) è ragionevolmente vincolata, in quanto proviene da una registrazione strumentale.

Queste considerazioni porterebbero a scartare la necessità di ricorrere all'ipotesi di terremoto caratteristico, per spiegare la sismicità osservata; una modesta percentuale di eventi caratteristici (vedi Fig. 6b) può comunque essere invocata per giustificare il comportamento imputato su base geologica ad alcune strutture (vedi Peruzza, 1999b; Barchi et al., 1999); si noti come attribuendo il 33% del momento sismico totale ad un comportamento in terremoto caratteristico si ottiene una distribuzione cumulativa con pendenza costante, fino ad una brusca caduta a M_2 .

12.3 Sismicità attribuita alle sorgenti lineari

Il problema che si pone ora è quantificare l'attività delle strutture lineari, e valutarne l'impatto sulla stima della pericolosità. Il problema della quantificazione energetica è stato affrontato e solo parzialmente risolto sul tavolo geologico incaricato della parametrizzazione delle sorgenti sismogenetiche (Barchi et al., 1999) e nel contributo sul model-

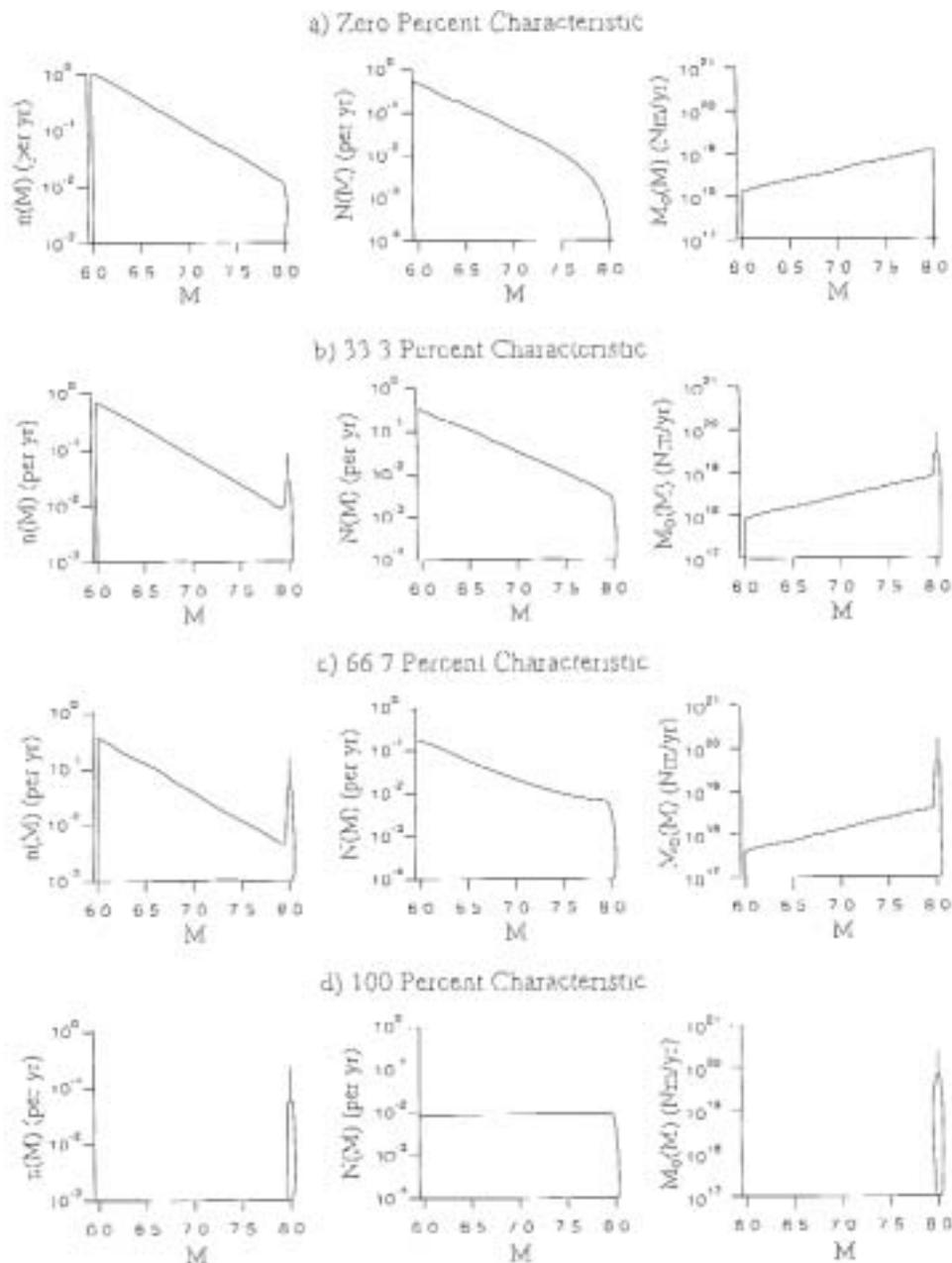


Fig. 6 - Andamento teorico delle distribuzioni della sismicit , in funzione del modello teorico di occorrenza dei terremoti; figura tratta da Field et al., 1999. Le tre colonne rappresentano rispettivamente il numero di eventi, il numero cumulativo di eventi, e il tasso di momento sismico in funzione della magnitudo.

lo di segmentazione (Peruzza, 1999b); questi contributi infatti hanno ipotizzato l'entit  dell'evento massimo associabile alle strutture, e in qualche caso suggerito, o scartato, il modello di occorrenza dei terremoti maggiormente indiziato per la struttura. Questi sono elementi che possono essere giudicati sufficienti nel momento in cui ci si

Tab. 3 - Caratterizzazione finale prescelta per il modello di pericolosità a sorgenti lineari.

	Segmento	Tipo	M max	Tlast (a.D.)	T_ char	Tipo sismicità	Dipend tempo	Risultati
C	Gubbio	B?	<= 6.0	?	400	char	poisson	Fig. 10
	Gualdo Tadino	A	6.0-6.5	1751	750	G-R	Tdep	Prob<2% solo basse M
E	Colfiorito	A?	~6.2	1997?	1300	G-R	Tdep	Prob<2% solo basse M
N	Norcia	A	~6.7	1703	1550	G-R	Tdep	Prob<2% solo basse M
T R	AV Aterno	A	6.0-6.5	1703	700	char	Tdep	Prob<2% solo basse M
	C.Felice-Ov.Pezza	A	6.5	1300	750	char	Tdep / poisson	Fig. 14 / Fig. 10
A	Fucino	A	7.0	1915	2100	G-R	Tdep	Prob<2% solo basse M
L						/ char		OUT
E	Marsicano- Barrea	B	>6.7	?	3300	G-R	poisson	Fig. 9 / Fig. 10
						/ char		
E	Bove-Vettore	A	6.5-6.7	<350	1550	char	Tdep	Fig. 14
	Laga-Gorzano	B	6.5-6.7	?	2850	char	poisson	Fig. 10
S	C.Imperatore	A?	7.0	<1000	1900	char	Tdep	Fig. 14
T	MV Aterno	B?	6.0-6.5	?	750	char	poisson	Fig. 10
	Morrone-Sulmona	A?	~6.5	<100	1200	char	Tdep	Fig. 14
	Aremogna-5Miglia	B?	6.0-6.5	?	1500	char	poisson	Fig. 10
O	Leonessa	B	<6.5	?	1500	char	poisson	Fig. 10
V	Rieti	B?	~6.5	?	1600	char	poisson	Fig. 10
E S	Sora	A	~6.5	1654?	2450	char	Tdep	Prob<2% OUT
	Cassino	B?	~6.5	?	1800	char	poisson	Fig. 10

pone come obiettivo la formulazione, ad esempio, di uno scenario deterministico, ma non lo sono altrettanto in una analisi della pericolosità di tipo probabilistico. Non è neppure possibile applicare a questo tipo di sorgenti una tecnica quale quella utilizzata in passato per le sorgenti areali; l'estensione dell'area interessata dai singoli segmenti (o dallo loro proiezione superficiale), e contemporaneamente l'incertezza delle localizzazioni dei terremoti non consentono infatti una associazione di routine terremoto-struttura; inoltre, molte strutture sono sicuramente asismiche, nel periodo storico documentato, e pertanto non possono essere "tarate" sul contenuto del catalogo dei terremoti.

Per affrontare questo aspetto che ha conseguenze cruciali nella valutazione della pericolosità sismica, ho deciso, pertanto, di seguire indipendentemente le due ipotesi limite prima descritte, ovvero attribuire a ciascuna struttura la G-R troncata, oppure una distribuzione gaussiana associata all'ipotesi di terremoto caratteristico. I due tipi di distribu-

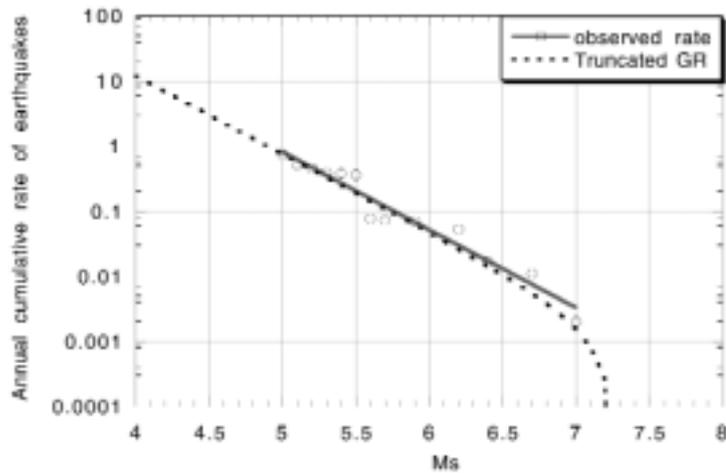


Fig. 7 - Fitting del tasso annuo di terremoti da catalogo con modello G-R troncato: la curva a tratteggio è ottenuta risolvendo esplicitamente l'equazione, imponendo il tasso annuo di momento sismico pari a $4.0 \cdot 10^{17}$ Nm/yr. La massima magnitudo attesa per l'area raggiunge il valore di 7.26.

zioni verranno applicate alternativamente alle strutture lineari selezionate, vincolando la distribuzione sull'unico elemento "originale" disponibile per la struttura stessa: il valore di magnitudo massima attesa, e il relativo periodo di ritorno riferito a tale evento. Il primo si basa su considerazioni geometriche e geologiche, talvolta integrate dall'evidenza sismologica; il secondo invece è stato assunto pari al valore ottenuto tramite il criterio della conservazione del tasso di momento sismico nel segmento proposta da Field et al. (1999), come segue:

$$1/T = \text{Char_Rate} = \mu \cdot V \cdot L \cdot W / 10^{1.5 \cdot M + 9.05} \quad (1)$$

dove T indica il periodo di ritorno, Char_Rate il tasso annuo medio di occorrenza, μ è il modulo di rigidità, posto pari a $3 \cdot 10^{10}$ Nm, e le altre grandezze sono quelle definite in Tab. 1 di Peruzza (1999b).

Consapevolmente, non si tratta del valore ottimale associabile a ciascuna struttura; esso ha però il pregio di una coerenza interna che non sempre si riscontra nel giudizio esperto che ha fornito la parametrizzazione dell'evento massimo delle strutture in analisi.

12.3.1 Modello G-R troncato

In Fig. 8 vengono rappresentati i valori individuali (cerchi aperti) e cumulativi (triangoli uniti da tratto continuo) del tasso di sismicità (in magnitudo) delle strutture analizzate; in confronto a tratteggio viene rappresentata la G-R ottenuta da catalogo per l'area complessiva.

La pendenza b della G-R ricavata in Fig. 5 è stata quindi applicata a ciascuna struttura, scalandola opportunamente in relazione all'evento massimo previsto, e ricavando così i tassi di occorrenza per classi di magnitudo da utilizzarsi nel tradizionale codice di calcolo (Bender and Perkins, 1987): esso verrà impiegato con l'utilizzo di sorgenti non

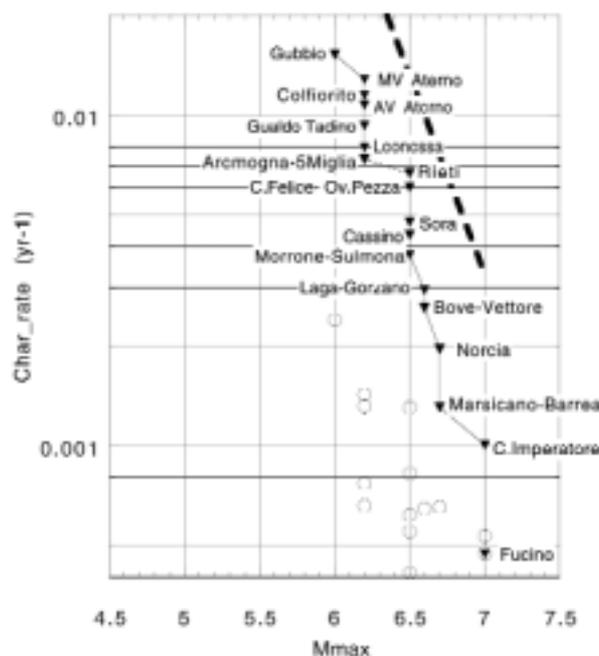


Fig. 8 - Tasso annuo di occorrenza del terremoto massimo per ognuna delle strutture lineari individuate in Fig. 2.

più areali, ma lineari.

I risultati che ne derivano sono riportati in Fig. 9, sempre in relazione alla probabilità di non superamento al 90% in 50 anni, valori di PGA con la medesima legge di attenuazione usata in Fig. 1.

Il panorama delle accelerazioni previste cambia in modo drammatico, raggiungendo valori massimi di oltre 0.7 g in corrispondenza dell'Aquilano; è interessante notare che anche sorgenti caratterizzate da estensioni limitate, e/o massime magnitudo attese inferiori a 6.5 (esempio Gubbio) raggiungono valori notevoli di accelerazione nel near-field, cosa peraltro in parte legata alla modalità di attenuazione nel campo vicino della relazione proposta (Ambraseys et al., 1996).

L'assunzione di attribuire una sismicità del tipo G-R ad ogni struttura è molto forte, e si scontra con l'assenza di sismicità associata a diverse strutture nel millennio di catalogo storico analizzato. Delle ulteriori considerazioni sono riportate nel paragrafo relativo al bilanciamento energetico.

12.3.2 Modello a terremoto caratteristico

Il secondo caso limite analizzato consiste nell'attribuire a ciascuna sorgente un comportamento esclusivamente legato ad un modello di terremoto caratteristico, situazione che analogamente alla precedente (seppure con le motivazioni opposte) non può essere valida per tutte le strutture proposte. In prima approssimazione, l'evento caratteristico verrà comunque considerato un evento poissoniano, ricadendo, nella classificazione

proposta dal WGCEP (1995) nella tipologia B proposta per le strutture.

La distribuzione della sismicità della struttura, in questo caso, viene modellata tramite una distribuzione gaussiana, centrata sul valore di magnitudo massima attesa; il coefficiente che regola l'ampiezza della campana (il parametro σ della gaussiana) è stato imposto pari a 0.5, tale in pratica da annullare il contributo della sismicità con magnitudo al di fuori all'incirca dell'intervallo $M_{\max} \pm 0.7$; distribuzioni più piccate sul valore di M_{\max} si sono dimostrate inadeguate per l'inserimento nel codice tradizionale, che lo consente solo in quanto si basa sull'approccio numerico, e non analitico, al problema.

Il quadro di pericolosità (Fig. 10) che deriva da questo secondo caso limite è abbastanza stupefacente, seppur del tutto comprensibile: le zone a massima pericolosità restano legate alle sole strutture che hanno un elevato tasso annuo di occorrenza del terremoto massimo (vedi Fig. 11), mentre il valore di magnitudo associato gioca un ruolo subordinato: in alcune zone si sommano i contributi di diverse strutture, creando le aree a massima pericolosità.

QUESTA CONSIDERAZIONE CI PERMETTE DI RICONOSCERE CHE L'IMPATTO PIU' CRITICO NELLA ANALISI DI PERICOLOSITA' IMPOSTATE SU MODELLO A TERREMOTO CARATTERISTICO SIA DA IMPUTARE AL TEMPO MEDIO DI RITORNO DELL'EVENTO MASSIMO, E NON TANTO AL VALORE DI MAGNITUDO ASSOCIATO, CHE INTERVIENE COME CONTRIBUTO DI SECONDO ORDINE.

L'esperienza maturata nel passato con l'uso di diverse formulazioni dell'attenuazione della PGA, consiglia comunque una notevole cautela nel generalizzare questa evidenza ad altre relazioni di attenuazione, per il diverso comportamento che esse possono manifestare in relazione alla magnitudo.

12.3.3 Bilanciamento energetico

In questo paragrafo si commentano le possibili incongruenze derivanti dall'utilizzo di uno o l'altro dei due casi limite proposti per la quantificazione dell'attività delle strutture.

Nel primo caso analizzato (12.3.1), l'adozione generalizzata di un modello G-R trova riscontro nell'analisi della sismicità complessiva dell'area desunta da catalogo (vedi Figg. 5 e 6, e le considerazioni relative) e nel comportamento osservato per le strutture attivate in epoca storica. Al contrario, la maggioranza delle strutture riconosciute su base geologica non presenta alcuna sismicità recente associata, e viene pertanto favorita l'ipotesi di un comportamento discontinuo, tipico del modello a terremoto caratteristico.

Se conteggiamo ora il contributo delle strutture individuali in termini di tasso di momento sismico, possiamo confrontare questo valore con quanto calcolato per l'area complessiva analizzata tramite il catalogo. Le strutture attive riconosciute e parametrizzate sono sicuramente un sottoinsieme delle strutture effettivamente presenti nell'area, prova ne è il fatto che un significativo numero di terremoti, anche di magnitudo rilevante, non sono stati ricondotti ad alcuno dei segmenti proposti; il valore di tasso di momento sismico rilasciato dalle sole strutture lineari non solo non deve superare il tasso di momento sismico attribuito complessivamente all'area, ma anzi deve lasciare il margine

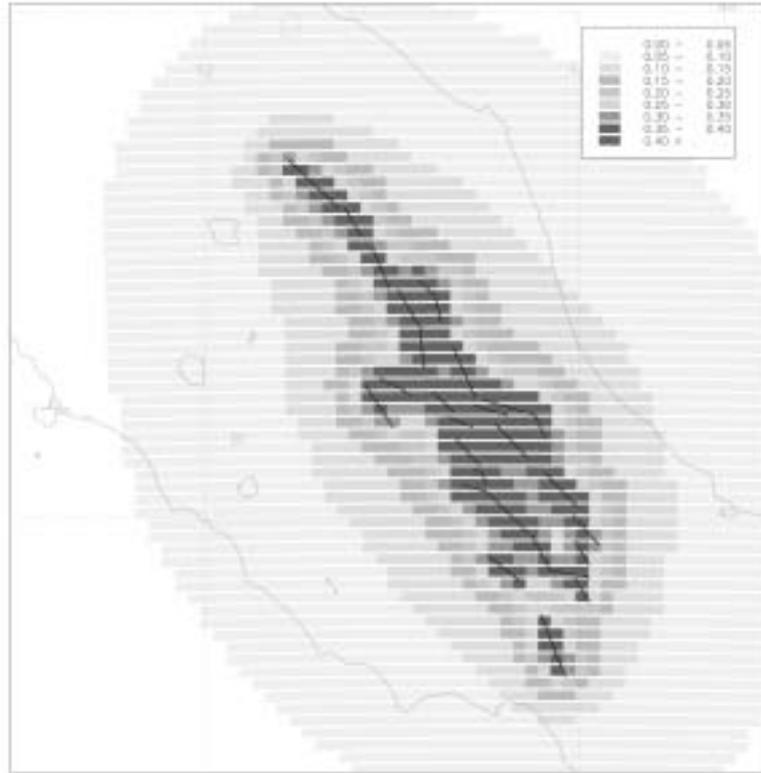


Fig. 9 - PGA non superata al 90% in 50 anni: sorgenti lineari, parametrizzate tramite G-R. Tempi di intercorrenza poissoniani; relazione di attenuazione di Fig. 1 (la figura a colori è riportata in Appendice a pag. 173).

sufficiente affinché vengano conteggiati anche gli eventi non ricondotti a strutture. In caso contrario, la parametrizzazione proposta fa emergere una incongruenza di fondo, che richiede il ripensamento sul modello di occorrenza adottato, o sulle parametrizzazioni (di strutture e di catalogo) utilizzate.

E' agevole riconoscere in Fig. 12 che il contributo di momento sismico (in un periodo di riferimento, per comodità, preso pari a 100 anni) legato al modello di occorrenza tipo G-R (tratteggio grosso) è complessivamente confrontabile con il contributo legato alla formulazione proposta per l'evento caratteristico (barra orizzontale nera). Nel dettaglio, le tre curve sottili rappresentano il rilascio di momento sismico in funzione della magnitudo per i tre sistemi di strutture riconosciute, e suggeriscono un impatto molto simile per il sistema assiale (attivo storicamente) e per quello orientale (dove viceversa sono disponibili solo alcune evidenze paleosismologiche), mentre subordinata è l'importanza del sistema occidentale.

Il tasso di momento sismico ricostruito da catalogo (barra verticale grigia, definita $3-4 \cdot 10^{17}$ Nm/yr in 12.2.3) per i terremoti che ricadono in un'area ben più vasta supera di molto poco la stima legata alle sole strutture lineari: il bilanciamento energetico suggerisce pertanto un "eccesso di momento sismico" attribuito alle strutture, sia nell'ipotesi

generalizzata G-R, sia quando la formulazione dei tassi di sismicità si basa sull'ipotesi di terremoto caratteristico. Alternativamente, bisogna invocare una sensibile incompletezza del catalogo, oppure una sottostima degli eventi ivi riportati, o ancora la più forte assunzione di fluttuazioni della sismicità non riconoscibili nei 1000 anni di catalogo.

Le considerazioni preliminari che possono derivare dall'analisi di questi dati sono quindi le seguenti:

- 1) alcune strutture (circa il 30%) DEVONO essere parametrizzate tramite una DISTRIBUZIONE G-R, dato il comportamento manifestato in periodo storico;
- 2) è ragionevole ricorrere a comportamenti tipo TERREMOTO CARATTERISTICO per la restante percentuale di strutture riconosciute su base geologica (circa 70%); bisogna però verificare che questa ipotesi non vada in contrasto con l'evidenza sperimentale legata al catalogo dei terremoti, che non richiede terremoti caratteristici per spiegare la sismicità dell'area: in caso contrario, si introduce deliberatamente un modello che differisce dalle osservazioni disponibili;
- 3) in ogni caso la stima dei valori di MAGNITUDO MASSIMA ATTESA E DEI TEMPI MEDI DI RICORRENZA ASSOCIATI induce qualche PROBLEMA DI BILANCIAMENTO ENERGETICO complessivo; appare infatti troppo limitato lo scarto esistente fra il contributo delle sole strutture lineari riconosciute, e il contenuto del catalogo, dato che è dichiarata a priori L'INCOMPLETEZZA DELLE STRUTTURE LINEARI PARAMETRIZZATE, RISPETTO A QUELLE EFFETTIVAMENTE ATTIVE. Il processo di ricontrollo e revisione dei dati disponibili può anche in alternativa invocare un sottodimensionamento delle magnitudo dei terremoti storici, l'incompletezza dell'informazione, oppure, più radicalmente, bisogna immaginare che il periodo storico documentato non sia un campione rappresentativo dell'intero ciclo sismico attribuibile all'area.

Indirettamente, quindi, la stima di pericolosità fornisce dei suggerimenti di massima per riconsiderare i parametri energetici (magnitudo massima, tempo medio di ricorrenza di tali eventi), e quindi anche geometrici, associati alle strutture riconosciute. Pur essendo la magnitudo massima un elemento di secondo ordine, rispetto al rateo, nel risultato di pericolosità, un modello globale deve spiegare contemporaneamente catalogo e osservazioni sulla fagliazione, senza introdurre elementi discordanti tra loro; oppure deve essere in grado di motivare le cause della disparità. Aumentando il tasso di sismicità delle strutture individuali, rispetto a quanto previsto dal solo catalogo dei terremoti, le mappe di Figg. 9 e 10 propongono comunque una ipotesi cautelativa della pericolosità sismica dell'area.

12.4 Dipendenza temporale

L'introduzione del tempo trascorso dall'ultimo evento nella previsione era il secondo obiettivo di questo contributo.

Il problema della memoria viene affrontato limitatamente ai modelli tipo "renewal processes", ovvero i modelli con memoria esclusiva dell'ultimo evento (vedi Garavaglia e Guagenti, 1999); il problema verrà affrontato tramite l'utilizzo di tassi medi equivalen-

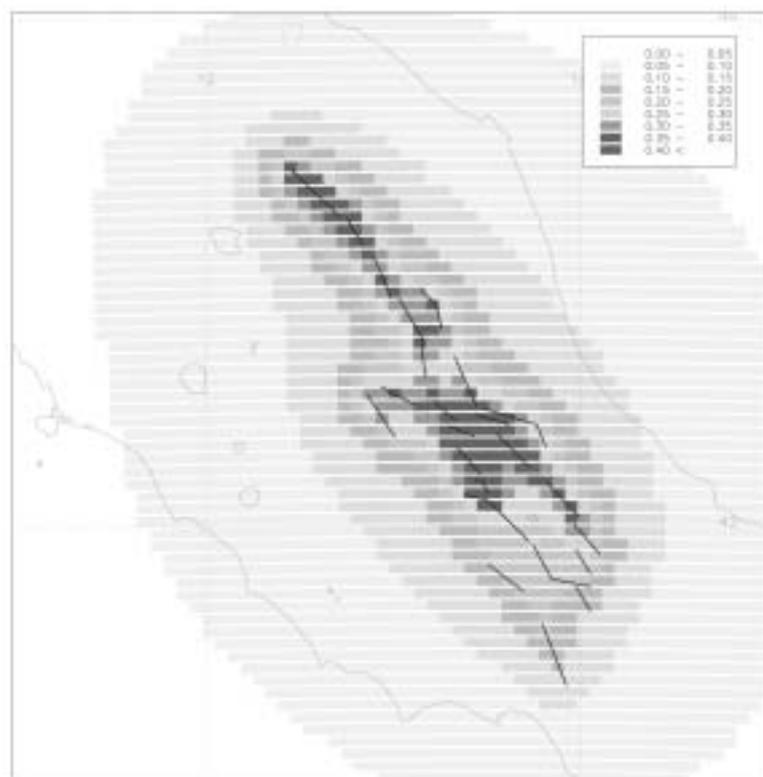


Fig. 10 - PGA non superata al 90% in 50 anni: sorgenti lineari, parametrizzate come evento caratteristico. Tempi di intercorrenza poissoniani; relazione di attenuazione di Fig. 1 (la figura a colori è riportata in Appendice a pag. 173).

ti a simulare una dipendenza temporale (vedi ad es. Wu et al., 1995), e non in modo formalmente corretto, con l'introduzione di distribuzioni diverse per i tempi di intercorrenza. Vi sono due motivazioni, a supporto di questa scelta: inanzitutto ho ritenuto più importante studiare la sensibilità delle stime di hazard a diverse ipotesi di dipendenza temporale, piuttosto che affrontare i problemi derivanti dalla modifica delle distribuzioni degli intertempi. Considerando poi che l'area investigata contiene al suo interno un numero significativo di strutture, è ragionevole pensare che l'effetto combinato di molti processi renewal indipendenti dia come risultato ad un generico sito ancora un processo casuale, modellabile quindi come evento stazionario; questa ipotesi è tanto più valida quando più ci si allontana dalla struttura sorgente individuale. Pertanto, l'uso dello schema poissoniano, nella valutazione dell'hazard, non viene mantenuto solo per semplificare la procedura, ma anche per rispettare la caratteristica del "processo al sito"; se infatti possiamo avanzare l'ipotesi che una sorgente non sia un motore casuale di terremoti, ma sia dotata di memoria, non altrettanto possiamo sostenere per un sito generico, "illuminato" contemporaneamente da più sorgenti non casuali; il processo di sito, sommatoria degli N processi di sorgente, manterrà le caratteristiche di casualità del processo stazionario. I risultati ottenuti possono pertanto essere ritenuti validi come ordine di grandezza, e rapporti relativi, per siti che non si trovino proprio nelle immediate vicinanze di una struttura atti-

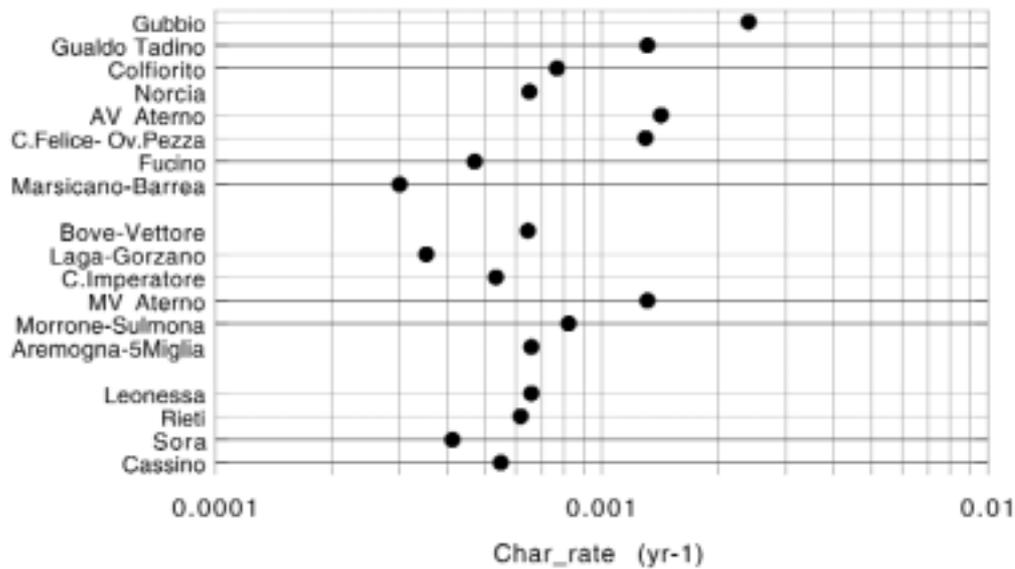


Fig. 11 - Tasso di occorrenza dell'evento massimo per ogni struttura. E' evidente in Fig. 10 il massimo impatto delle strutture Gubbio, Gualdo Tadino, Alta Valle dell'Aterno, C.Felice / Ovindoli-Pezza, Media Valle dell'Aterno.

va: bisogna comunque ricordare che l'immediato near-field è anche il campo dove sono massime le incertezze legate all'attenuazione del parametro stimatore del movimento del terreno.

Dato che formalmente il motore di generazione della stima di hazard è ancora poissoniano si manterrà la definizione di PGA non superata al 90% IN 50 ANNI; esso deve però essere interpretato come una stima valida SUI PROSSIMI 50 ANNI, CON IL TEMPO INIZIALE DELLA VALUTAZIONE AL 1999.

I tassi di sismicità utilizzati per le sorgenti negli esempi che seguono sono quelli legati al modello a terremoto caratteristico: è concettualmente irrisolto prevedere la possibilità di un trattamento time-dependent applicato ad un modello G-R. Ancora una volta vengono analizzati due casi limite, rappresentati rispettivamente dall'utilizzo di una unica distribuzione dei tempi di intercorrenza per tutte le strutture parametrizzate, o dall'uso di funzioni diverse in relazione alle caratteristiche della sorgente: nel primo caso si farà ricorso ad una distribuzione gamma, definita da Garavaglia e Guagenti (1999), nel secondo al modello lognormale utilizzato in Peruzza (1999b). La probabilità condizionata di accadimento dell'evento massimo nei prossimi 50 anni viene utilizzata per normalizzare i tassi di sismicità di un fittizio modello poissoniano, dando dei valori di periodo di ritorno apparenti, fisicamente poco plausibili, ma di efficace impatto per l'analisi di sensibilità sull'hazard.

12.4.1 Distribuzione unica dei tempi di intercorrenza

In questo caso è stata associata ad ogni struttura la distribuzione gamma parametriz-

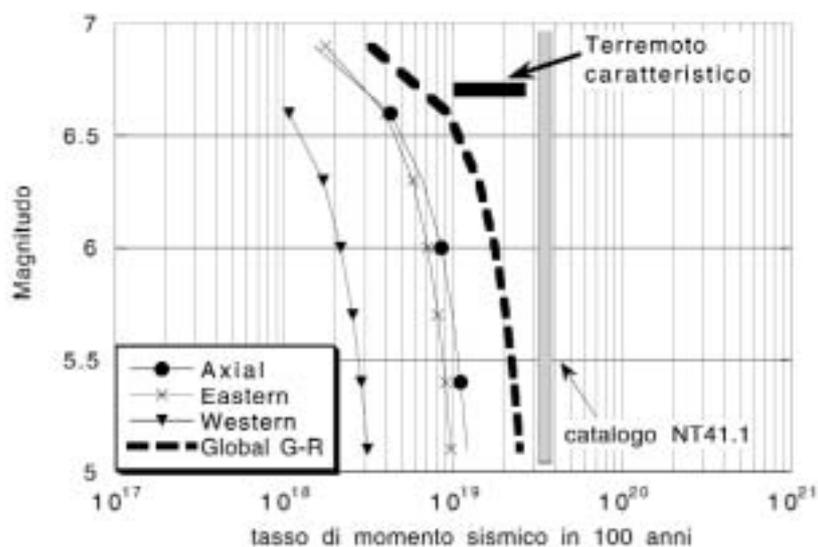


Fig. 12 - Confronto fra il momento sismico rilasciato in 100 anni relativo alle strutture lineari, parametrizzate tramite G-R (curve) e per comportamento caratteristico, e catalogo dei terremoti.

zata da Garavaglia e Guagenti (1999) sui tempi medi di ricorrenza derivati per le 18 strutture tramite la tecnica della conservazione del tasso di momento sismico. Ogni struttura si differenzia per il suo proprio Telapsed, ovvero tempo trascorso dall'ultimo evento caratteristico; come ipotesi di lavoro, per tutte le strutture che non hanno una datazione dell'ultimo evento (tipo B, vedi Peruzza, 1999a; 1999b) è stato imposto un Telapsed pari a 1000 anni.

La probabilità condizionata di accadimento di terremoto caratteristico nei prossimi 50 anni viene rappresentata in Fig. 13 con la barra in tono chiaro di grigio: da questo valore viene ricalcolato il tasso medio equivalente annuo di evento caratteristico atteso per la struttura in una ipotesi poissoniana. Segue poi un trattamento analogo a quanto presentato in paragrafo 12.3.2. Il contributo delle sorgenti che presentano una probabilità di accadimento nei prossimi 50 anni inferiore al 2% è nullo, e pertanto esse non vengono considerate nella fase di calcolo.

I risultati in termini di PGA sono riportati in Fig. 13; appare evidente, dal confronto con Fig. 10 come vengono ora enfatizzate le strutture per le quali il tempo trascorso dall'ultimo evento è elevato; in alcuni casi (Gubbio, Marsicano, Laga, Aremogna, Leonessa, Rieti, Cassino) il tempo trascorso è solamente una ipotesi di lavoro, che DEVE OVVIAMENTE ESSERE VALIDATA SPERIMENTALMENTE, per potersi tradurre in un calcolo realistico della pericolosità.

12.4.2 Distribuzione dei tempi di intercorrenza differenziate

L'ultima opzione considerata è quella che prevede il calcolo della probabilità condizionata di accadimento di un terremoto caratteristico tramite una funzione di distribuzione adattata a ciascuna struttura; non essendo disponibili intertempi di eventi caratteristici sulla stessa faglia, tali da tarare sperimentalmente la funzione di distribuzione in

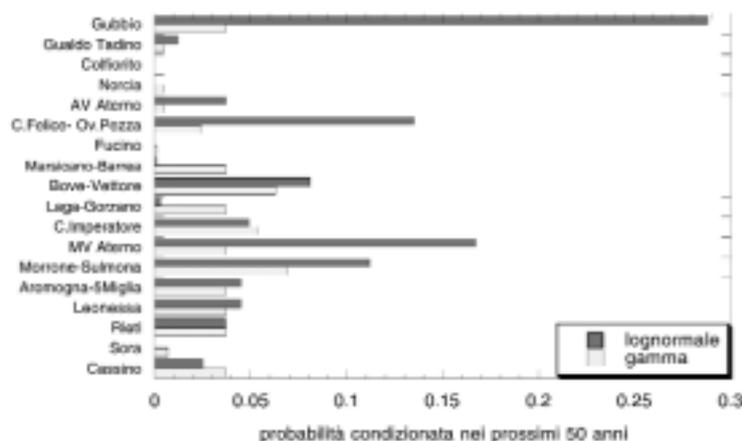


Fig. 13 - Probabilità di accadimento di un terremoto caratteristico nei prossimi 50 anni (dal 1999) considerando due diverse formulazioni della distribuzione dei tempi di intercorrenza in un modello renewal: per le strutture prive di datazione dell'ultimo evento è stato imposto un tempo trascorso fittizio di 1000 anni.

modo individuale, essa viene adattata come quanto proposto in WGCEP (1995). Si utilizza in questo caso la distribuzione lognormale, a deviazione standard imposta, come in Peruzza et al., 1997 e Peruzza, 1999b; la distribuzione lognormale presenta formalmente delle controindicazioni, ben descritte in Garavaglia e Guagenti (1999), ma ciò nonostante è stata ampiamente utilizzata in letteratura; la probabilità relativa all'evento massimo nei prossimi 50 anni è graficata in tono scuro ancora in Fig. 13. I valori di probabilità sono sensibilmente maggiori, rispetto al modello unico parametrizzato tramite la distribuzione gamma; essi si traducono in un notevole contributo in termini di tasso medio annuo equivalente per alcune strutture.

In Fig. 15 sono riportati i risultati in PGA derivanti da questa elaborazione: ancora, le strutture che presentano una probabilità di accadimento nei prossimi 50 anni inferiore al 2% non contribuiscono al risultato finale. Si associa in questa mappa l'effetto legato alla dipendenza temporale con l'effetto indotto da un elevato tasso di occorrenza, dominante sul valore della magnitudo del terremoto caratteristico, come quanto già visto in Fig. 9; dove interferiscono i contributi legati a strutture diverse, si osserva un ulteriore innalzamento dei valori attesi. L'effetto della sorgente domina comunque nel campo vicino, mentre è destinato a smorzarsi nel raggio di una trentina di km.

12.5 Conclusioni

Le analisi di sensibilità di questo contributo mettono in luce tre aspetti cruciali, da considerare per passare ad una nuova generazione di prodotti di pericolosità sismica, che utilizzino sorgenti legate alla fagliazione attiva, e introducano il fattore tempo nella previsione.

Il primo è la necessità di una formalizzazione molto robusta delle ipotesi relative

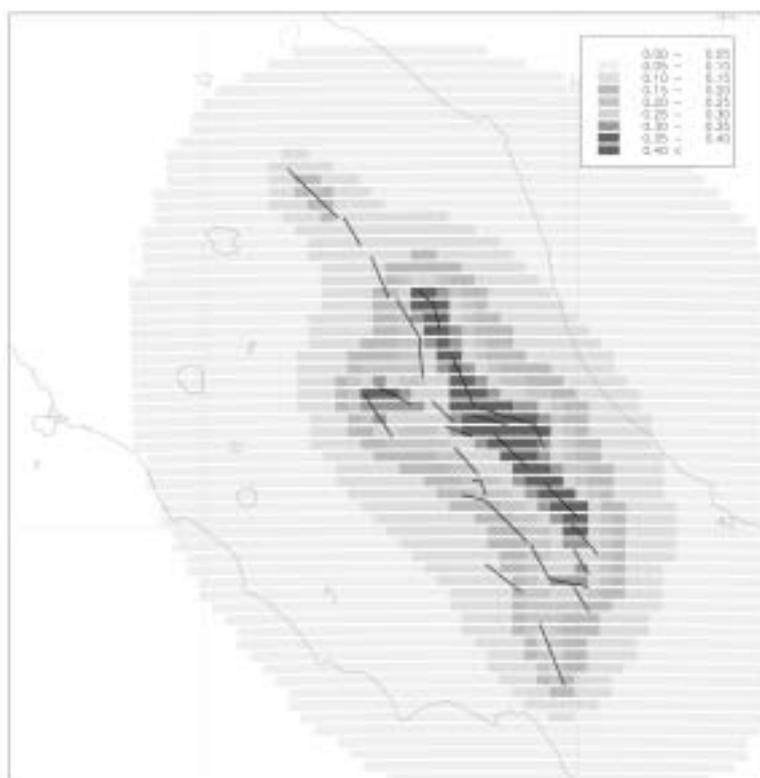


Fig. 14 - PGA non superata al 90% in 50 anni, a partire dal 1999: sorgenti lineari, parametrizzate come evento caratteristico; tempo medio equivalente di intercorrenza ricavato dalla distribuzione gamma, valida per tutte le strutture; relazione di attenuazione di Fig. 1 (la figura a colori è riportata in Appendice a pag. 174).

alle sorgenti: oltre ai tradizionali problemi di identificazione geometrica ed energetica è importante definire ragionevoli ipotesi sul tipo di sismicità da attribuire alle sorgenti, qualora questa non possa essere basata sulle sole osservazioni legate ai terremoti del passato. Senza generalizzare una evidenza che sicuramente è anche dipendente dalla relazione di attenuazione scelta per il parametro indicatore di hazard, il tempo medio di occorrenza degli eventi forti ($M > 6.0$) sembra essere il parametro che più influenza i risultati ottenibili, e deve pertanto essere vincolato con quante più possibili considerazioni indipendenti si riescano a raccogliere; la magnitudo massima influenza in modo subordinato, e possono essere molto modesti i contributi di eventi molto forti, purchè sufficientemente rari (vedi Figg. 10 e 11).

Il fattore tempo trascorso dall'ultimo evento (nell'ipotesi ristretta di comportamento caratteristico, e processo renewal) introduce sensibili modifiche nei risultati attesi; le fluttuazioni fra un modello di occorrenza e l'altro possono portare a valori molto diversi di probabilità condizionata di accadimento (vedi Fig. 13) e questo ha conseguenze estremamente pesanti sulle stime di pericolosità che ne derivano (vedi Figg. 14 e 15). Per questo motivo appare più robusto l'utilizzo di una unica funzione distribuzione dei tempi di intercorrenza (par. 12.4.1), calibrata sperimentalmente (vedi Garavaglia e Guagenti,

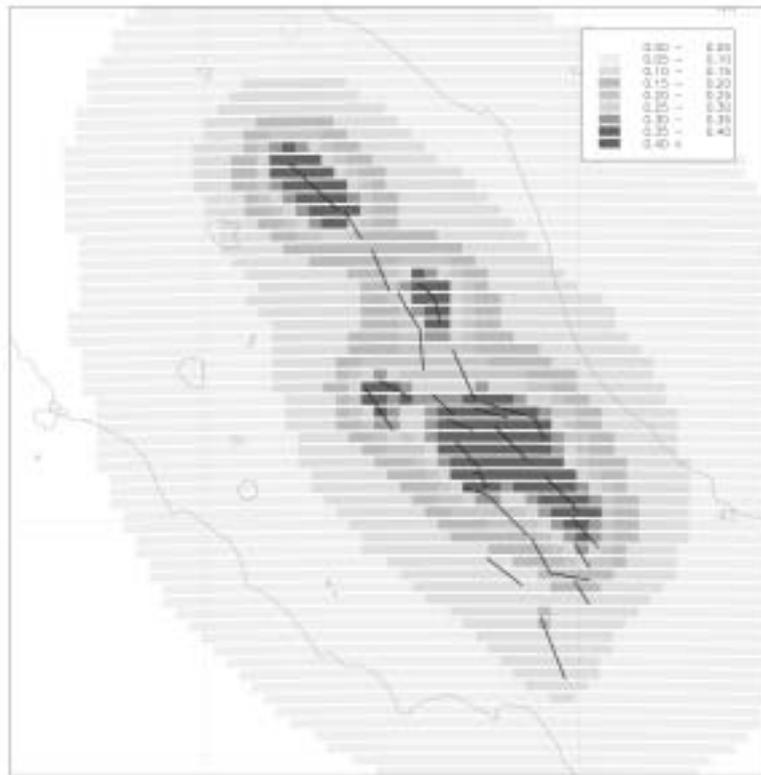


Fig. 15 - PGA non superata al 90% in 50 anni, a partire dal 1999: sorgenti lineari, parametrizzate come evento caratteristico; tempo medio equivalente di intercorrenza ricavato da distribuzioni lognormali, adattate individualmente ad ogni struttura; relazione di attenuazione di Fig. 1 (la figura a colori è riportata in Appendice a pag. 174).

1999); forse essa non è però adeguata per tutte le strutture riconosciute in Italia Centrale, che coprono un intervallo energetico abbastanza ampio (vedi ad. es. Gubbio); solo la disponibilità di ulteriori datazioni sperimentali renderà possibile risolvere queste incertezze.

Infine, il bilanciamento complessivo tentato, fra le grandezze coinvolte dalle strutture lineari e la sismicità complessiva dell'area desunta dal catalogo, solleva la questione di fondo della completezza delle informazioni disponibili, e dell'importanza di analizzare le assunzioni implicite sottese dai modelli selezionati. La completezza deve essere valutata non solo in termini di catalogo sismico, ma anche in termini di strutture individuate, affinché si possa giungere ad una spiegazione per le ipotesi di deficit energetico. Possiamo anche accettare di utilizzare un modello di sismicità che raddoppia il potenziale sismico di un'area; farlo senza sollevare il problema della compatibilità fra quanto osservato nel passato e quanto previsto per il futuro può portare a conseguenze drammatiche.

Il lavoro qui proposto ha cercato di raccogliere le informazioni disponibili per le strutture, analizzando l'impatto derivante da alcune possibili ipotesi limite: la Tab. 3 cerca

pertanto di riassumere queste evidenze, per una valutazione realistica della pericolosità dell'area. Si tratta, ovviamente, di una istantanea delle conoscenze datata, e perfezionabile da ogni nuova evidenza che si renda disponibile.

Bibliografia

- Albarelo D., Bosi V., Brammerini F., Lucantoni A., Naso G., Peruzza L., Rebez A., Sabetta F. e Slejko D. (1999): Carte di pericolosità sismica del territorio nazionale. *Quaderni di Geofisica*, in stampa.
- Ambraseys N. N., Simpson K. A. and Bommer J. J. (1996): Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, **25**, 371-400.
- Anderson J. G. and Luco J. E. (1983): Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 471-496.
- Augliera P., Spallarossa D. e Bindi D. (1999): Prove di bilanciamento energetico: analisi dei parametri di sorgente relativi agli eventi registrati da una Rete Sismica Temporanea in Umbria-Marche nel periodo ottobre-novembre 1997. In questo volume.
- Barchi M., G. Lavecchia, F. Galadini, P. Messina, A.M. Michetti, L. Peruzza, A. Pizzi, E. Tondi, E. Vittori (a cura di) (1999): *Sintesi delle conoscenze sulle faglie attive in Italia Centrale: parametrizzazione ai fini della caratterizzazione della pericolosità sismica*. CNR-GNDT, Volume congiunto dei Progetti 5.1.2, 6a2, 5.1.1, Esagrafica, Roma, in stampa.
- Bender B. and Perkins D.M. (1987): *Seisrisk III: a computer program for seismic hazard estimation*. U.S. Geological Survey, Bulletin 1772, 48 pp.
- Camassi R. e Stucchi M. (1997): *NT4.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia di danno (versione NT4.1.1)*. GNDT, Milano, 66 + XXVII pp. e Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html>.
- Faccioli E. e Petrini V. (coord.) (1996): Risultati dell'analisi di rischio sismico per tutta la nazione riferita al patrimonio abitativo. Elaborazioni basate sui dati ISTAT 1991. GNDT-ING-SSN, Rapporto per il Dipartimento Protezione Civile, Internet: http://www.dstn.it/ssn/PROG/G_RISCHI/premessa_f.html
- Field E. H., Jackson D. D., and J. F. Dolan (1999): A Mutually Consistent Seismic-Hazard Source Model for Southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 559-578.
- Galadini F. e E. Vittori (coord.) (1998): Progetto 5.1.2 Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili. CNR-GNDT Progetto Esecutivo 1998, Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P512/home.html>
- Garavaglia E. e Guagenti E. (1999): Distribuzioni a confronto per i terremoti maggiori in Italia Centrale. In questo volume.
- Gasperini P e Monachesi G. (coord.) (1998): Progetto 5.1.3 Catalogo strumentale del terremoto 1981-1997. CNR-GNDT Progetto Esecutivo 1998, Internet: <http://ibogfs.df.unibo.it/user2/paolo/www/gndt.html>
- Gruppo di Lavoro (1999): Proposta di riclassificazione sismica del territorio nazionale. *Ingegneria Sismica*, **14/1**, 5-14.
- Hanks T.C. and H. Kanamori (1979): A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- Pantosti D., D'Addezio G. and Cinti F.R. (1996): Paleoseismicity of the Ovindoli-Pezza fault, Central apennines, Italy: a history including a large previously unrecorded earthquake in

- Middle Ages (890-1300). *J. Geophys. Res.*, **101**, 5937-5959.
- Peruzza L., Pantosti D., Slejko D. and Valensise L. (1997): Testing a New Hybrid Approach to Seismic Hazard Assessment: an Application to the Calabrian Arc (Southern Italy). *Natural Hazard*, **14**, 113-126.
- Peruzza L. (coord.) (1998): Progetto 6a2 Metodi Innovativi per la Stima dell'HAZARD (MISHA) - Applicazione all'Italia Centrale. CNR-GNDT Progetto Esecutivo 1998, e Internet: http://macrisk1.ogs.trieste.it/MISHA_web/home.html
- Peruzza L. (a cura di) (1999a): *Parametrizzazione degli elementi sismogenetici assoggettabili ad un trattamento time-dependent*. Relazione esterna OGS18/99 OGA6, Trieste, 12 pp., e Internet: http://macrisk1.ogs.trieste.it/MISHA_web/text/fase1.html
- Peruzza L. (1999b): Modello di segmentazione per l'Italia Centrale: dal consenso sulle strutture, alla probabilità di accadimento di un terremoto maggiore. In questo volume.
- Postpischl D. (ed.) (1985): *Catalogo dei terremoti italiani dal 1000 al 1980*. Quaderni della ricerca scientifica, 114, 2B
- Romeo R. and Pugliese A. (1998): A global earthquake hazard assessment in Italy. *Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, Balkema.
- Rotondi R. (1999): Analisi statistica di una zonazione Umbria-Marche e studio di variazioni della distribuzione di probabilità del tempo di intercorrenza. In questo volume.
- Scandone P. (1997): Linea di ricerca 2 "Sismotettonica". In: Corsanego A., Faccioli E., Gavarini C., Scandone P., Slejko D. e Stucchi M. (a cura di), *L'attività del GNDT nel triennio 1993 - 1995*, CNR - GNDT, Roma, 67-96.
- Scandone P. e M. Stucchi (coord.) (1998): Progetto 5.1.1 Mappa delle zone sismogenetiche e probabilità degli eventi associati. CNR-GNDT Progetto Esecutivo 1998, Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P511/home.html>
- Slejko D., Peruzza L. and Rebez A. (1998): Seismic hazard maps of Italy. *Annali di Geofisica*, **41**, 183-214.
- Westaway R. (1992): Seismic moment summation for historical earthquakes in Italy: tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15437-15464.
- Working Group on California Earthquake Probabilities (1995): Seismic Hazards in Southern California: Probable Earthquakes, 1994-2024. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 379-439.
- Wu S. C., Cornell C. A. and Winterstein S. R. (1995): A Hybrid Recurrence Model and Its Implication on Seismic Hazard Results. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1-16.