

## 8. INVERSIONE PER LA SORGENTE DA DATI MACROSISMICI

*Livio Sirovich<sup>(1)</sup>, Franco Pettenati<sup>(2)</sup>, Muzio Bobbio<sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup> OGS, Trieste

<sup>(2)</sup> GNDT c/o OGS, Trieste

### 8.1 Introduzione

Quale contributo al Progetto esponiamo l'inversione dei dati macrosismici degli eventi di Fabriano del 24.04.1741 e Camerino del 28.07.1799, appartenenti rispettivamente alle zone sismogenetiche n. 46 e n. 47 del modello ZS4, proposto da Scandone (1997) e commentato in Scandone e Stucchi (1999). L'UO OGS-TS2 (Sirovich resp.) ha invertito le intensità macrosismiche osservate per dedurne ipotesi quantitative e riproducibili sulla geometria e sulla cinematica della sorgente. Trattandosi di terremoti storici, il risultato di tali inversioni può essere paragonato solo con informazioni neotettoniche e sismotettoniche. È stato effettuato un confronto quantitativo con le leggi di attenuazione disponibili, per la verifica del metodo come alternativa a tali correlazioni empiriche.

### 8.2 Metodo di inversione

Il metodo si basa sulla funzione cinematica KF (Sirovich, 1996) e sulla sua inversione automatica trial-and-error realizzata da Pettenati et al. (1999), attraverso la minimizzazione della somma dei quadrati dei residui nei punti di osservazione. I residui sono dati dalla differenza tra intensità di sintesi e quelle osservate nei siti. La tecnica ha migliori possibilità di successo se applicata a un piano quotato generato da una scossa singola. Inoltre, l'approccio asintotico, che sta alla base della KF, richiede che i siti siano compresi entro distanze  $3-10 < R < 80-100$  km dalla proiezione in superficie della faglia.

Per l'inversione descritta viene dato il range dei parametri (valore iniziale, valore finale, step). L'angolo di strike va da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , con il dip a destra. Per l'angolo di rake è adottata la convenzione descritta in Sirovich (1997): esso viene misurato sul piano di faglia, visto dal tetto, in senso antiorario rispetto al vettore di slip, da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  (da  $1^\circ$  a  $179^\circ$ : componente inversa). La lunghezza della faglia, a partire dal punto di nucleazione, è

---

Contributo dell'UO OGS-TS2

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

Responsabile: L. Sirovich

Contratto n. 98.03227.PF54 (Michelini resp.)

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

positiva (L+) nel verso dello strike e negativa nel verso antistrike. Il numero di mach - rapporto fra la velocità di rottura del fronte di faglia e la velocità delle onde S ( $V_s$ ) - è positivo (mach+) nel verso dello strike, è negativo (mach-) nel verso antistrike. L'algoritmo di inversione prevede l'uso combinato di un massimo di 5 parametri. Nell'eseguirlo, in un primo momento esploriamo il range dei parametri con step non troppo piccoli; successivamente, infittiamo le sintesi automatiche trial-and-error adottando step anche molto piccoli (che richiedono tempi di calcolo considerevoli). Quando disponibili, vincoliamo le inversioni ad ampi range di valori comprendenti quelli previsti da stime quantitative di origine strumentale (o derivati semi-quantitativamente da considerazioni neotettoniche).

Allo scopo di fornire immagini più leggibili, i piani quotati vengono rappresentati mediante tassellazione (Pettenati et al., 1999). Il nostro gruppo di ricerca ritiene che la tassellazione possa venire utilmente impiegata anche per la pesatura dei residui e per altre applicazioni legate alle inversioni (in particolare, per osservare effetti spuri derivanti dall'inosservanza del principio di Nyquist nel piano). Usando la tassellazione abbiamo per esempio invertito i dati macrosismici del terremoto di Northridge del 1994 (Pettenati et al., 1999). In questa sede tuttavia le inversioni sono state condotte solo sui valori di intensità direttamente osservati nei siti.

È necessario infine precisare che, date le tecniche adottate, le nostre soluzioni presentano sempre un'ambiguità di  $180^\circ$  nell'angolo di rake: è pertanto impossibile riconoscere la soluzione di faglia diretta, da quella inversa, ed il senso in una trascorrente.

Nel seguito usiamo i termini "tassello" e "poligono di Voronoi" come sinonimi.

Ai fini della inversione dei dati macrosismici mediante la KF, abbiamo scelto di non usare gradi intermedi, che vengono arrotondati al grado superiore. Nei casi finora trattati, questa scelta non ha influito in misura determinante sui risultati; tuttavia, le sue conseguenze nelle presenti inversioni vanno ancora determinate.

### ***8.2.1 Analisi statistica***

Prima di effettuare le inversioni, vengono effettuate analisi statistiche con il metodo di Chauvenet (Barnett and Lewis, 1978) per l'individuazione di eventuali outliers, che vengono esclusi dal data set. Se esistono informazioni sulla geologia e morfologia dei siti, vengono anche tolti i siti che presentano risposte locali significativamente anomale dal punto di vista statistico.

Per ragioni spiegate altrove e, in particolare, per tradurre i valori adimensionali della funzione KF in intensità (Pettenati et al., 1999), la messa a punto di questa tecnica ha richiesto la trattazione preliminare di una serie di terremoti che dovevano rispondere ad alcuni requisiti:

- 1) essere sufficientemente forti;
- 2) avere buoni dati macrosismici;
- 3) avere buone registrazioni sismografiche;
- 4) essersi verificati nella stessa regione (la zona prescelta è stata la greater Los Angeles region).

### 8.2.2 Calcolo delle incertezze

Il calcolo degli errori nei parametri determinati ha seguito la metodologia esposta in Sirovich and Pettenati (1999): l'assunto è che l'incertezza massima delle osservazioni macrosismiche sia di 2 gradi; si fa quindi variare un parametro, partendo dal corrispondente valore della sintesi ottimale, e si confronta il risultato con i dati della sintesi migliore; quando in uno dei siti si ottiene una differenza di 2 gradi di intensità, si ottiene il valore di sensibilità del modello su quel parametro (il simbolo // riportato fra gli errori in Tab. 5 indica scarsa sensibilità del modello al parametro considerato)

Per confronto, vengono riportati gli errori ricavati da una nuova applicazione delle simulazioni tipo bootstrap (metodo MonteCarlo, vedi Press et al., 1992). In tale applicazione, vengono creati N insiemi di dati, perturbando le intensità del piano quotato, e su ogni nuovo insieme di dati viene eseguita una inversione con range di parametri che devono rispettare le seguenti caratteristiche:

- 1) essere uguali per ogni insieme di dati;
- 2) essere centrati sui parametri ottimali.

Includendo nelle inversioni anche i dati osservati originali, si ottengono N+1 sintesi con parametri che si distribuiscono attorno ai valori della sintesi migliore. Si procede infine ad una statistica, onde calcolare la deviazione standard di ogni parametro. Gli insiemi di dati vengono creati soddisfacendo le seguenti condizioni:

- 1) del data set osservato viene lasciato invariato almeno il 37% dei dati originali;
- 2) gli scostamenti avvengono seguendo una distribuzione normale (teoria degli errori), salvo che per i gradi estremi (che non devono superare i limiti di I e XI rispettivamente);
- 3) abbiamo inoltre scelto di attribuire particolare importanza al limite danno/non danno (V-VI): di conseguenza, i gradi osservati  $\leq V$  non possono superare il VI e quelli  $\geq VI$  non possono diventare inferiori al V; ad esempio, se la distribuzione lo richiede, un VI osservato può variare in più anche di tre gradi (caso molto raro), ma la sua variazione in meno viene limitata ad un solo grado.

### 8.2.3 Confronto con le leggi di attenuazione

Si sono confrontate le sintesi KF con quelle ottenibili con una delle migliori leggi di attenuazione disponibile (Peruzza, 1996), basata sul DOM4.1 (Monachesi e Stucchi, 1997).

Il confronto è stato fatto nel modo classico, direttamente sulle intensità osservate nei siti, calcolando la somma del quadrato dei residui (Icalc - Ioss), oppure con due test, concepiti in modo da sfruttare la tassellazione. Il primo, detto V-V, confronta i suddetti residui quadratici, pesati con l'inverso dell'area di ogni poligono di Voronoi generato da ogni dato osservato (per comodità si rappresentano i residui di questo test, moltiplicati per 1000). Questo metodo garantisce maggior peso alle intensità epicentrali, in genere fittamente campionate, e riduce l'influenza di zone a bassa densità di

siti. Al test V-V sono associati due indicatori che analizzano i residui divisi per classi di intensità: *Acf* che calcola la percentuale di area tassellata dei dati osservati correttamente predetta dalla sintesi; *Anm* che esprime la percentuale di area di una intensità calcolata che non copre il piano quotato tassellato della corrispondente intensità osservata. La sintesi ottimale deve totalizzare  $Acf=100\%$ ,  $Anm=0\%$ . Il secondo test sui residui, detto C-V, calcola la somma dei quadrati dei residui delle intensità in elementi infinitesimi (celle). In ogni cella si calcola il quadrato del residuo fra il valore calcolato via contour della sintesi migliore (generata su una fitta griglia regolare) e il valore risultante dal piano quotato tassellato. In questo caso, abbiamo messo a punto una tecnica di pesatura che tiene conto del crescere dell'incertezza del valore di intensità osservato per ogni tassello al crescere della distanza fra sito generatore del poligono e singola cella. Il peso è dato dalla formula  $w = 2^{-(pd/md)}$  in cui  $pd$  è la distanza cella-sito e  $md$  è la media delle distanze fra tutti i siti. Al bordo del poligono di area media, il peso  $w$  vale 0.5. Per maggiori dettagli si rimanda a Pettenati et al. (1999), e Sirovich and Pettenati (1999).

### 8.3 Fabriano 1741

L'epicentro di questo terremoto si trova nella zona sismogenetica n. 46, secondo il modello ZS4, proposto da Scandone e Stucchi (1999).

Il piano quotato usato in questa inversione proviene dal DOM4.1 (Monachesi e Stucchi, 1997) e i relativi parametri sono ricavati dal catalogo NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997):  $M_s=6.2$ , equivalente a  $M_0=2.2 \cdot 10^{25}$  dyne-cm secondo la relazione di Stover and Coffman (1993). Non abbiamo invertito i dati del catalogo CFTI perché sono in numero inferiore a 30.

Alla luce dei suaccennati limiti nell'applicabilità dell'approccio asintotico, dalla matrice dei siti disponibili per questo terremoto sono stati tolti 4 dati in zona mesosismica: Sasso (IX), Maiolati (VIII), Cupramonta (VIII) e Scisciano (VII). Cupramonta è poi risultato essere anche un outlier statistico. L'indagine è stata quindi eseguita su 116 dati (vedi il piano quotato osservato, tassellato, in Fig. 1).

Per alcuni parametri, le inversioni sono state vincolate ad (ampi) range nell'intorno dei valori suggeriti da osservazioni geologiche-neotettoniche regionali tratte da letteratura. In particolare, sono state tenute in conto due possibili famiglie di strutture: ipotesi a) faglie di tipo appenninico con direzioni NW-SE e meccanismi prevalentemente diretti, immergenti verso SW; ipotesi b) faglie con meccanismi prevalentemente trascorrenti con direzioni NNE-SSW.

In base a queste ipotesi, le inversioni automatiche sono partite dalle tre serie di range per i parametri da determinare riportate in Tab. 1; le coordinate epicentrali iniziali: lat. =  $43.383^\circ$ , lon. =  $12.983^\circ$ , e la magnitudo  $M_s=6.2$  sono tratte da NT4.1.1. Va preliminarmente osservata la complessità del piano quotato (gradi VI-IX a pelle di leopardo in zona mesosismica) e l'anomalo salto dal VII al V ai bordi dell'area danneggiata.



Fig. 1 - Piano quotato tassellato del terremoto di Fabriano 24.04.1741 relativo al Database DOM4.1. La linea grossa delimita il limite danno/non danno.

Il risultato relativamente migliore è stato ottenuto nella prova 3) con somma dei residui quadrati  $\Sigma r^2=200$ , strike= $220^\circ$ , rake= $180^\circ$  (strike-slip), dip= $85^\circ$ . A questo punto, visto che il minimo era stato raggiunto per un valore estremo, l'ipotesi b) è stata esplorata ulteriormente estendendo i valori di strike di  $20^\circ$  rispetto a quelli usati nelle prove 2) e 3), e facendo variare anche la profondità. È stato ottenuto il risultato: strike= $238^\circ$ , rake= $186^\circ$ , dip= $87^\circ$ , h=8 km (con  $\Sigma r^2=175$ ). Sono state altresì condotte ulteriori prove di inversione anche sull'ipotesi a), senza per altro avvicinarsi ai risultati dell'altra ipotesi (minimo ottenuto:  $\Sigma r^2=245$ ). Quale ulteriore verifica, è stata effettuata un'inversione a

Tab. 1 - Evento di Fabriano, 1741, parametri e loro intervalli inizialmente esplorati via inversione (step = variazione imposta al parametro). Tre famiglie di sorgenti ipotizzate in base a informazioni geologiche.

	1) ipotesi a)	2) ipotesi b)	3) ipotesi b)
strike [°]	da 100 a 160 (step=2)	da 0 a 40 (step=2)	da 180 a 220 (step=2)
rake [°]	da 60 a 120 (step=2)	da 150 a 210 (step=2)	da 150 a 210 (step=2)
dip [°]	da 30 a 60 (step=3)	da 70 a 90 (step=3)	da 70 a 90 (step=3)
prof. [km]	10	10	10
lung. [km]	$\pm 10$ (tot.=20)	$\pm 10$ (tot.=20)	$\pm 10$ (tot.=20)
mach N.	0.7	0.7	0.7
Vs [km/s]	3.5	3.5	3.5



Fig. 2 - Piano tassellato della sintesi migliore KF (Tab. 2), relativa al terremoto di Fabriano 24.04.1741 - Database DOM4.1.

medio step di campionamento parametrico, su tutto l'orizzonte dello strike (da  $0^\circ$  a  $355^\circ$ , step= $5^\circ$ ), del rake (da  $0^\circ$  a  $175^\circ$ , step= $5^\circ$ ), e del dip (da  $30^\circ$  a  $90^\circ$ , step= $5^\circ$ ). Tale verifica ha prodotto di nuovo una convergenza verso l'ipotesi b).

Quindi, sono stati esplorati anche gli altri parametri: lunghezze e numero di mach in entrambi i versi; profondità (con range da 8 a 24 km); momento sismico. Il risultato relativamente migliore, con  $\Sigma r^2=130$ , ha portato ad uno strike= $241^\circ$ , rake= $190^\circ$ , dip= $76^\circ$ , h=11 km, mach+=0.7, mach-=0.8,  $M_0=3.0 \cdot 10^{25}$  dyne-cm.

Le prove di inversione con priorità sulle coordinate epicentrali, e ulteriori verifiche mediante inversioni trial-and-error anche sugli altri parametri, hanno dapprima indicato l'opportunità di spostare l'epicentro verso NNE e poi portato a esplorare con maggior dettaglio i ranges da 43.43N a 43.49N, e da 13.01E a 13.10E.

Le inversioni dell'epicentro assieme agli altri parametri via via scelti, hanno portato infine i risultati a convergere su una soluzione - quella definitiva - che totalizza  $\Sigma r^2=92$ . I parametri dedotti per l'evento sono riportati in Tab. 2.

Durante il workshop di Roma del 30-31 marzo 1999, dopo la nostra esposizione sulla sintesi preliminare, ci era stato suggerito di provare a spostare l'ipocentro in profondità. Prove successive hanno confermato viceversa la profondità di 10 km come quella ottimale.

La Fig. 2 rappresenta il risultato finale. Si noti la quasi perfetta coincidenza tra il limite danno/non-danno della sintesi rispetto ai dati osservati (bordi ingrossati dei tassel-

Tab. 2 - Parametri sismologici dell'evento di Fabriano, 1741, dedotti via inversione del piano quotato macrosismico, corrispondenti a  $\Sigma r^2$  minimo (=92). I valori con  $\pm$  sono gli errori ricavati dal bootstrap; i valori tra parentesi, talora asimmetrici, sono i valori di sensibilità secondo Sirovich and Pettenati (1999).

Coordinate e momento sismico:	parametri geometrici:	parametri cinematici:
lat. epic.= $43^\circ.46N \pm 0^\circ.02$ (+0.03,-0.01)	strike= $236^\circ \pm 4^\circ$ (+7°,-8°)	mach N+= $0.75 \pm 0.03$ (+0.10,-0.05)
lon. epic.= $13^\circ.03E \pm 0^\circ.03$ (+0.02,-0.03)	rake= $198^\circ \pm 7^\circ$ (+11°,-17°)	mach N- = $0.80 \pm 0.04$ (+0.08,-0.04)
$M_0 = 2.9 \cdot 10^{25} \pm 0.3 \cdot 10^{25}$ dyne-cm (+ $4.1 \cdot 10^{25}$ ,- $2.1 \cdot 10^{25}$ )	dip= $79^\circ \pm 6^\circ$ (+27°,-13°)	$V_s = 3.55 \pm 0.04$ km/s (+0.20,-0.20)
	prof= $10 \pm 1.25$ km (+2,-3)	
	L+= $10 \pm 4$ km (+7,-7)	
	L- = $17 \pm 3$ km (+12,-12)	

li delle Figg. 1 e 2). Abbiamo evidenziato tale limite perché appare ragionevole ritenere che il limite danno/non-danno sia più attendibile per esempio del limite IV/V grado, o VI/VII grado. Ripetiamo comunque che nella Fig. 2 i poligoni di Voronoi sono utilizzati solo a scopi grafici. L'inversione è stata eseguita sui puri valori osservati nei siti. Ne consegue che il risultato della Fig. 2 è stato pilotato nella stessa misura da tutti i punti del piano quotato (anche da quelli della zona delle massime intensità, che nella Fig. 1 appaiono distribuite a pelle di leopardo). Detto solo per inciso, in questo caso l'inversione sui poligoni di Voronoi pesati conduce a una soluzione quasi coincidente con quella di Tab. 2 e Fig. 2.

- Vi sarebbero molti altri commenti da fare. In questo rapporto sintetico citiamo solo:
- 1) il piano quotato molto complesso, forse risulta affetto da amplificazioni di sito (e/o da errori);
  - 2) il risultato della nostra sintesi (cui contribuisce una taratura californiana) "parte bene"

Tab. 3 - Test statistici di confronto fra sintesi KF del terremoto Fabriano, 1741, e legge di attenuazione di Grandori et al. (1987) per ZS n. 46 (Peruzza, 1996).

Stimatore	$\Sigma r^2$ Puntuali:						$\Sigma r^2$ Test C-V	$\Sigma r^2$ Test V-V(·1000)				
	totali	V	VI	VII	VIII	IX		V	VI	VII	VIII	IX
Sintesi K	92	0	13	39	31	9	206.443	73.29				
Legge Isotropa	362	5	26	200	113	18	739.240	255.52				
Stimatore	Acf %:						Anm %:					
		V	VI	VII	VIII	XI		V	VI	VII	VIII	XI
Sintesi KF	100	49	40	25	65		13	85	20	58	52	
Legge Isotropa	8	9	6	2	10		95	91	49	80	84	

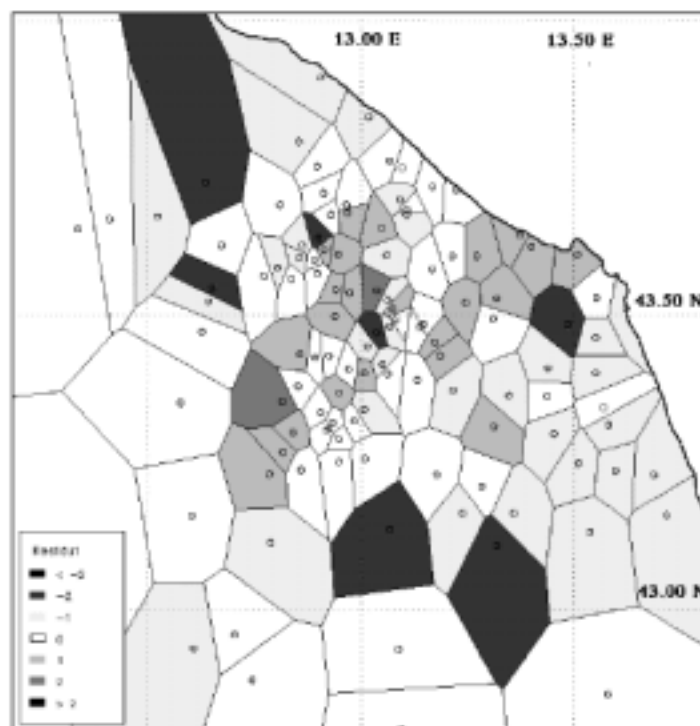


Fig. 3 - Mappa dei residui test V-V tra sintesi migliore KF e dati osservati, relativa al terremoto di Fabriano 24.04.1741 - Database DOM4.1.

dalla zona epicentrale (grado 9) e “arriva bene” ai bordi (grado 5-4), ma con un andamento che non rispecchia quello sperimentale (che collassa dal VII al V): ciò nonostante il limite danno/non-danno è riprodotto straordinariamente bene (un fatto simile ci è capitato per il terremoto di San Francisco del 1906).

La Tab. 3 riporta i dati del confronto tra la sintesi migliore e la legge di attenuazione data da Grandori et al. (1987), con i parametri riportati in Peruzza (1996), per la ZS 46. Vengono riportate le somme quadratiche dei residui nei siti ( $\Sigma r^2$  Puntuali); le sommatorie pesate nel test V-V e nel C-V, i test *Acf* e *Anm*. Si noti il netto successo della sintesi ottenuta mediante la KF, rispetto ai valori previsti dalla legge isotropa, sia nel test V-V, che nel test C-V. Gli indicatori *Acf* e *Anm* confermano i commenti fatti sopra. Si veda anche la distribuzione spaziale dei residui calcolato-meno-osservato nel test V-V (i residui,  $\leq 2$ , sono distribuiti in modo abbastanza casuale, vedi Fig. 3). La sintesi KF si adatta abbastanza bene sui siti di massima intensità (IX) anche se, naturalmente, non può simulare tutta la distribuzione a pelle di leopardo dei gradi VII-VIII, né il salto VII-V ai bordi. La legge isotropa (Fig. 4) mostra un’attenuazione troppo rapida, totalizzando valori di *Acf* tutti molto bassi, e di *Anm* molto alti, ad eccezione del grado 7 che ha *Anm*=0.49. Ciò si verifica perché il VII grado abbonda in tutto il piano quotato e quindi la legge isotropa ha una certa probabilità di stimare correttamente alcuni dei siti di tale grado.

Le figure 5 e 6 mettono a confronto i residui dei test C-V.



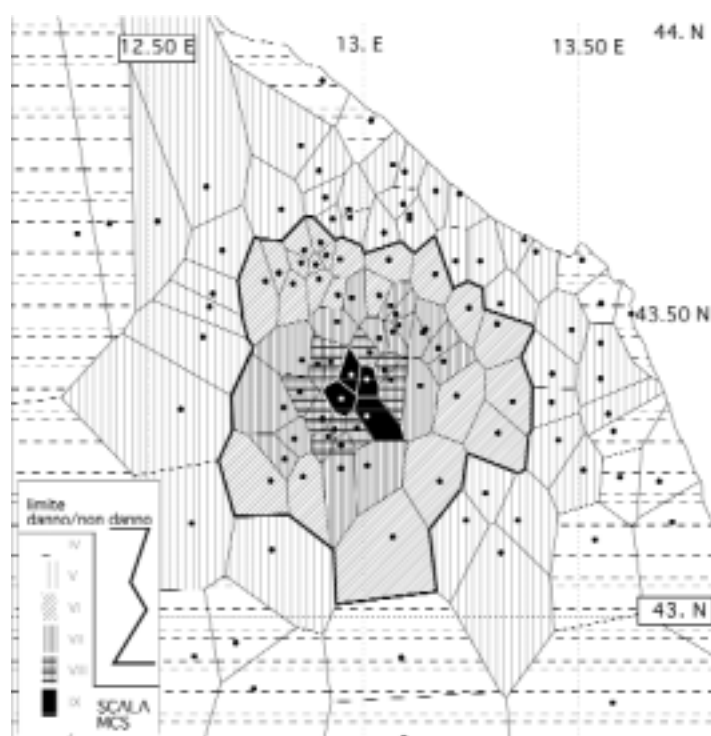


Fig. 4 - Piano tassellato relativo alla legge di attenuazione isotropa (Peruzza, 1996), per il terremoto di Fabriano 24.04.1741 - Database DOM4.1.

#### 8.4 Camerino 1799

Questo terremoto ricade nella zona sismogenetica n. 47, del modello ZS4 (Scandone, 1997).

Per la inversione sono stati usati i dati di tutti e due gli studi disponibili, rispettivamente tratti da DOM4.1 (Monachesi e Stucchi, 1997) e CFTI (Boschi et al., 1995); entro l'area di applicabilità dell'algoritmo KF, si hanno: 40 siti per il DOM4.1, 35 per il CFTI. La scelta di questo evento è stata dettata dalla vicinanza alla zona epicentrale della sequenza del 1997-1998 e per il fatto che è stato indicato come un evento probabilmente generato da una scossa singola (Stucchi, comunicazione scritta, 1998). Si ricorda a tal proposito che le zone sismogenetiche 46 e 47, tra il 1727 e il 1815 sono state interessate da una decina di terremoti di  $M_s \geq 5$  (alcuni a distanza di tempo molto breve).

I piani quotati, nonostante il basso numero di siti, si presentano ben distribuiti in una struttura spaziale abbastanza omogenea. Nei dati da catalogo DOM4.1 (Fig. 7), salti di 2 o più gradi (tra tasselli a contatto) si notano solo nelle zone poco campionate. A nord dell'epicentro, si verifica un passaggio diretto da VIII a VI a distanza ravvicinata. Nei dati del catalogo CFTI (non raffigurato) invece l'unica anomalia sono due siti epicentrali (Leteggiole e Caldarola) di grado VII, che si ubicano in mezzo a

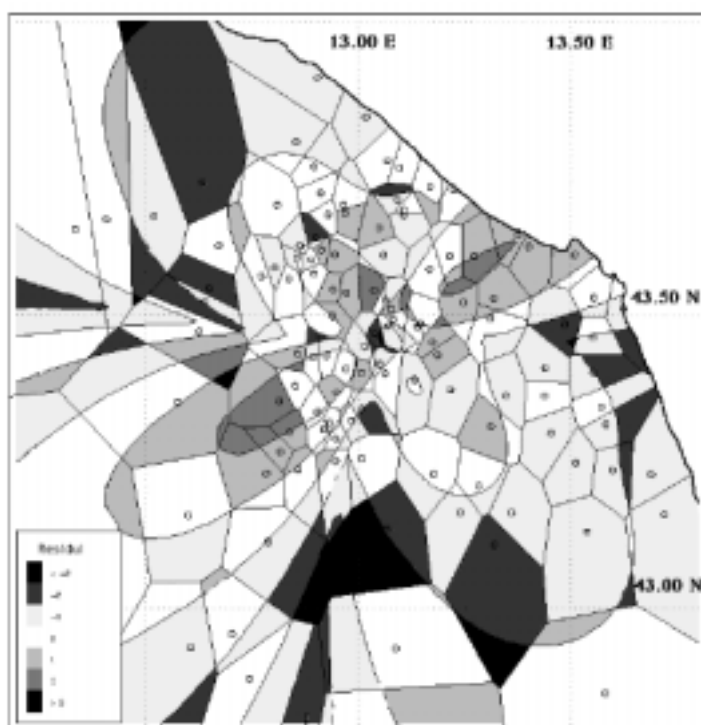


Fig. 5 - Mappa dei residui test C-V tra sintesi migliore KF e dati osservati, relativa al terremoto di Fabriano 24.04.1741 - Database DOM4.1.

zone di IX grado (il poligono di Caldarola, è a contatto con quello di grado massimo: IX-X).

Anche i parametri di partenza sono stati ricavati dai due cataloghi parametrici:  $M_s=6.2$  e  $I_0=IX$  per DOM4.1, da NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997);  $M_c=5.6$  e  $I_0=IX$  ( $I_{max}=IX-X$ ) per il CFTI.

Per una sintesi attendibile, nei limiti d'applicabilità della KF, dai dati del catalogo DOM4.1, sono stati tolti i siti epicentrali di Villa D'aria e Statte (IX), mentre dal catalogo CFTI nessuno. Dato il basso numero di siti di entrambi i cataloghi non si è proceduto ad alcuna analisi degli outlier (possibile solo per i gradi 7 e 8 in numero sufficiente).

Le inversioni sono state condotte prevalentemente sui residui puntuali; solo sul piano quotato del DOM4.1 è stata eseguita una serie di inversioni pesando con l'inverso dell'area del poligono generato dal dato osservato (test V-V), per un miglior controllo (vedi sotto).

Al contrario del precedente terremoto, in questo caso non si sono pilotate le sintesi sui dati di neotettonica esistenti, ma si è voluto verificare l'algoritmo lasciando liberi i parametri, specie quelli angolari. Le coordinate epicentrali, la profondità e le lunghezze dei due segmenti sono state vincolate dai dati già dalle prime prove. Le coordinate epicentrali sono state vincolate dai due gruppi di grado IX e IX-X, distribuiti attorno ai parametri epicentrali dei cataloghi, mentre le lunghezze sono risultate poco importanti. In base alla nostra esperienza, per magnitudo medio-basse, le lunghezze sono i parametri

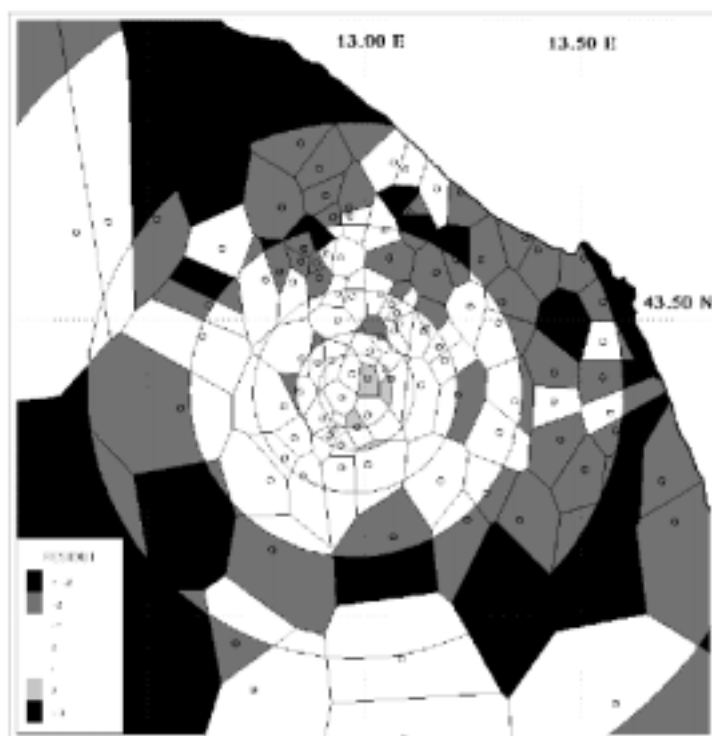


Fig. 6 - Mappa dei residui test C-V tra legge di attenuazione isotropa e dati osservati, relativa al terremoto di Fabriano 24.04.1741 - Database DOM4.1.

meno sensibili nell'adattamento ai dati macrosismici.

Cenno particolare va al momento sismico, i cui valori, ricavati dalle magnitudo disponibili da catalogo, e trasformati mediante la formula di Stover and Coffman (1993), sono risultati bassi, ai fini di un buon adattamento alle evidenze sperimentali, soprattutto in zona mesosismica.

#### 8.4.1 Database DOM4.1

E' stata innanzitutto condotta una inversione su tutto lo strike, con passo  $5^\circ$ , tutto il rake (da  $0^\circ$  a  $180^\circ$  o simmetricamente  $180^\circ$  a  $360^\circ$ ) con step  $5^\circ$ , il dip da  $30^\circ$  a  $90^\circ$  con step  $5^\circ$ , profondità da 8 a 12 km (passo 1 km). Come già accennato per le prove preliminari, il momento sismico è stato alzato dal valore  $2.2 \cdot 10^{25}$  ( $M_s=6.2$  da catalogo) al valore  $2.6 \cdot 10^{25}$  dyne-cm. Questo valore è stato usato come limite inferiore del range di indagine (limite superiore  $3.2 \cdot 10^{25}$  dyne-cm), con step  $1 \cdot 10^{24}$ . Sono stati ottenuti 2 minimi sulla direzione NW-SE:  $\Sigma r^2=20$  per strike= $150^\circ$  (rake= $220^\circ$ ) e  $\Sigma r^2=21$  per strike= $290^\circ$  (rake= $280^\circ$ ), immersioni di  $55^\circ$  verso SW e  $65^\circ$  verso NE rispettivamente. Le lunghezze e i mach number (positivi e negativi) sono stati tarati sui residui puntuali; i loro valori si sono assestati su  $L_{\pm}=10$  km, e  $\text{mach}_+=0.72$   $\text{mach}_-=-0.76$ . Data la piccola differenza degli scarti, si è proceduto anche con inversioni pesate (test

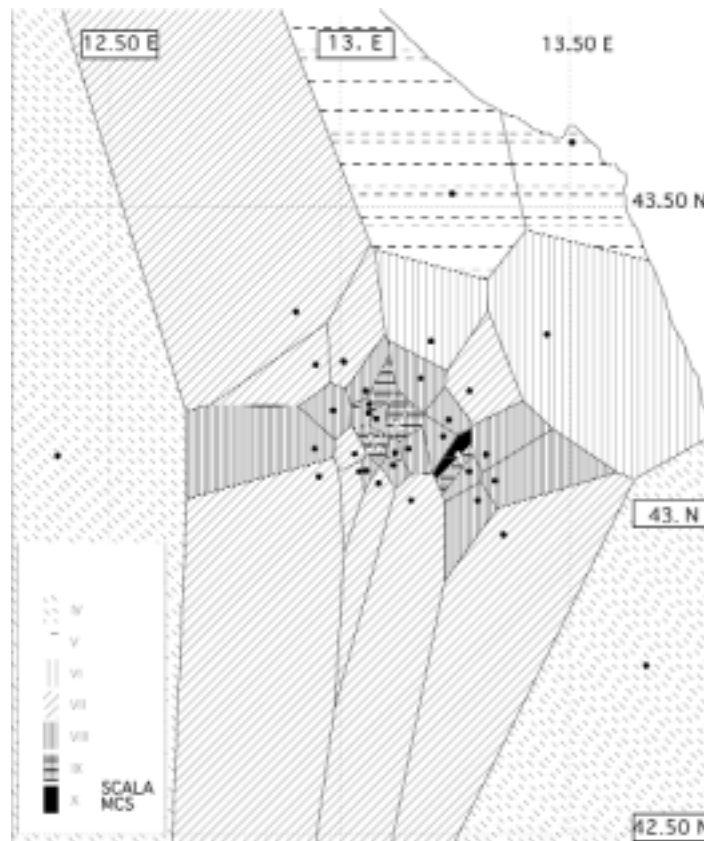


Fig. 7 - Piano quotato tassellato del terremoto di Camerino 28.07.1799 relativo al Database DOM4.1.

V-V). Stringendo il range dei parametri e diminuendo lo step, il risultato migliore è stato ottenuto per lo strike verso SE ( $152^{\circ}$ - $154^{\circ}$ ) con  $\Sigma r^2=1.26 \cdot 10^{-2}$ , contro il residuo  $\Sigma r^2=2.03 \cdot 10^{-2}$  per lo strike  $289^{\circ}$ . Il dip ottenuto finora si aggira sui  $50^{\circ}$  (verso SW) e

Tab. 4 - Parametri sismologici dell'evento di Camerino, 1799 (da DOM4.1), dedotti via inversione del piano quotato macrosismico, corrispondenti a  $\Sigma r^2=13$  nei siti. I valori con  $\pm$  sono gli errori ricavati dal bootstrap; i valori tra parentesi, talora asimmetrici, sono stati calcolati secondo Sirovich and Pettenati (1999).

Coordinate e momento sismico:	parametri geometrici:	parametri cinematici:
lat. epic.= $43^{\circ}.15N \pm 0^{\circ}.02$ (+0.07,-0.05)	strike= $154^{\circ} \pm 5^{\circ}$ (+20 $^{\circ}$ ,-25 $^{\circ}$ )	mach N+= $0.68 \pm 0.05$ (+0.18,-0.28)
lon. epic.= $13^{\circ}.17E \pm 0^{\circ}.01$ (+0.05,-0.06)	rake= $219^{\circ} \pm 8^{\circ}$ (+24 $^{\circ}$ ,-30 $^{\circ}$ )	mach N- = $0.76 \pm 0.04$ (+0.15,-0.26)
$M_0=3.0 \cdot 10^{25} \pm 0.4 \cdot 10^{25}$ dyne-cm (+1.76 $\cdot 10^{25}$ ,-2.7 $\cdot 10^{24}$ )	dip= $50^{\circ} \pm 6^{\circ}$ (+26 $^{\circ}$ ,-18 $^{\circ}$ )	Vs = $3.52 \pm 0.04$ km/s (+0.06,-0.06)
	prof= $9 \pm 2$ km (+5,-5)	
	L+ = $10 \pm 5$ km (+40,-9)	
	L- = $10 \pm 8$ km (+40,-6)	

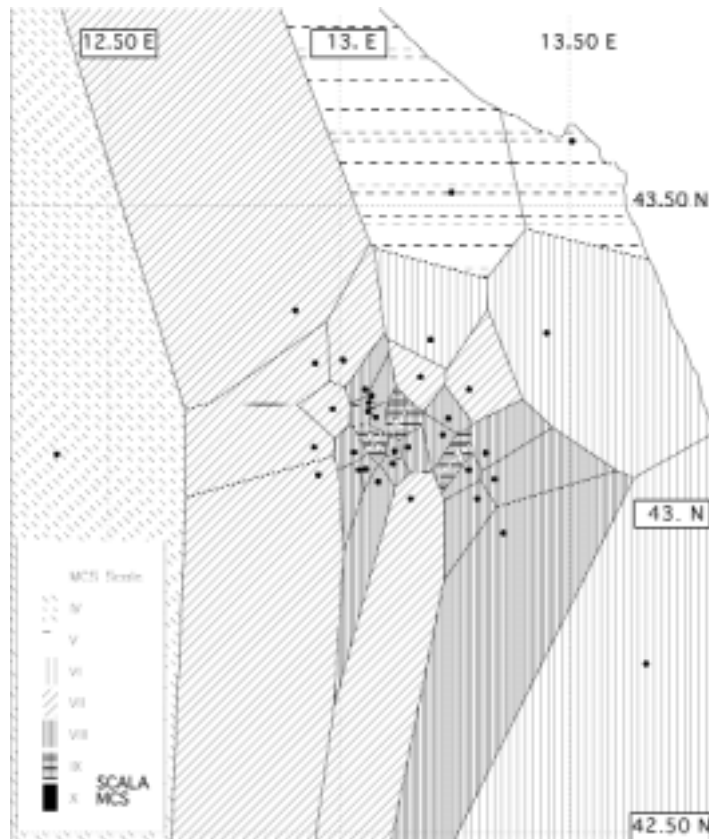


Fig. 8 - Piano tassellato della sintesi migliore KF (Tab. 4), relativa al terremoto di Camerino 28.07.1799 - Database DOM4.1.

rake sui  $225^\circ$ .

Le prove successive si sono concentrate sulle coordinate epicentrali ottenendo i valori di lat= $43.15N$ , lon= $13.17E$ , con  $\Sigma r^2=14$ , su strike= $152^\circ-154^\circ$ . Altri aggiustamenti hanno riguardato la velocità delle onde S, senza grandi miglioramenti.

Tab. 5 - Parametri sismologici dell'evento di Camerino, 1799 (da CFTI), dedotti via inversione del piano quotato macrosismico, corrispondenti a  $\Sigma r^2=13$ . I valori con  $\pm$  sono gli errori ricavati dal bootstrap; i valori tra parentesi, talora asimmetrici, sono i valori di sensibilità calcolati secondo Sirovich and Pettenati (1999).

Coordinate e momento sismico:	parametri geometrici:	parametri cinematici:
lat. epic.= $43^\circ.14N \pm 0^\circ.02$ (+0.04,-0.04)	strike= $144^\circ \pm 4^\circ$ (+21,-19)	mach N+= $0.68 \pm 0.04$ (+0.17,-0.26)
lon. epic.= $13^\circ.14E \pm 0^\circ.01$ (+0.07,-0.02)	rake= $227^\circ \pm 7^\circ$ (+18,-17)	mach N- = $0.72 \pm 0.04$ (+0.25,-0.17)
$M_0=3.1 \cdot 10^{25} \pm 0.3 \cdot 10^{25}$ dyne-cm (//,- $2.8 \cdot 10^{25}$ )	dip= $53^\circ \pm 5^\circ$ (+11,-25)	Vs = $3.52 \pm 0.06$ km/s (//,-1.36)
	prof= $9 \pm 1.5$ km (+4,-4)	
	L+ = $10 \pm 4$ km (//,-10)	
	L- = $10 \pm 3$ km (//,-10)	

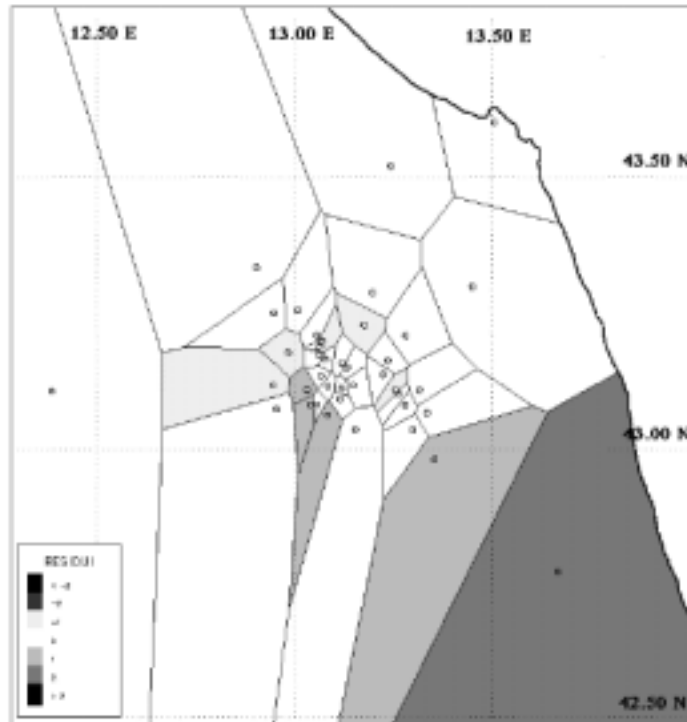


Fig. 9 - Mappa dei residui test V-V tra sintesi migliore KF e dati osservati, relativa al terremoto di Camerino 28.07.1799 - Database DOM4.1.

A questo punto ci siamo concentrati sul problema del basso grado osservato nel sito di Civitella del Tronto (III-IV), posto in direzione SE dall'epicentro. La sintesi che utilizza strike=154°, rake=222°, dip=48°, h=9 km,  $M_0=3.2 \cdot 10^{25}$ , fornisce un valore di grado 6 a questo sito. Sono state eseguite inversioni con mach positivo inferiore (fino ad un minimo di 0.58) o accorciando il segmento di faglia in quel verso (da 10 a 1 km). Non si sono ottenuti risultati risolutivi. La lunghezza L+ è praticamente insensibile, mentre il

Tab. 6 - Risultati test statistici di confronto sintesi terremoto Camerino 1799 (database DOM4.1) e legge di attenuazione di Grandori per ZS n. 47 (Peruzza, 1996).

Stimatore	$\Sigma r^2$ Puntuali:								$\Sigma r^2$ Test C-V	$\Sigma r^2$ Test V-V(-1000)						
	totali	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X								
Sintesi KF	13	4	0	0	4	3	1	1	185.903	9.17						
Legge Isotropa	40	8	5	5	11	10	0	1	179.981	35.80						
Stimatore	Acf: IV V VI VII VIII IX X								Anm: IV V VI VII VIII IX X							
Sintesi KF	%	51	100	100	81	63	80	0	%	0	0	68	7	66	22	//
Legge Isotropa	%	0	0	0	55	77	100	0	%	//	//	100	42	79	80	//

N.B. il simbolo // significa che il valore è indeterminato (0 diviso 0)

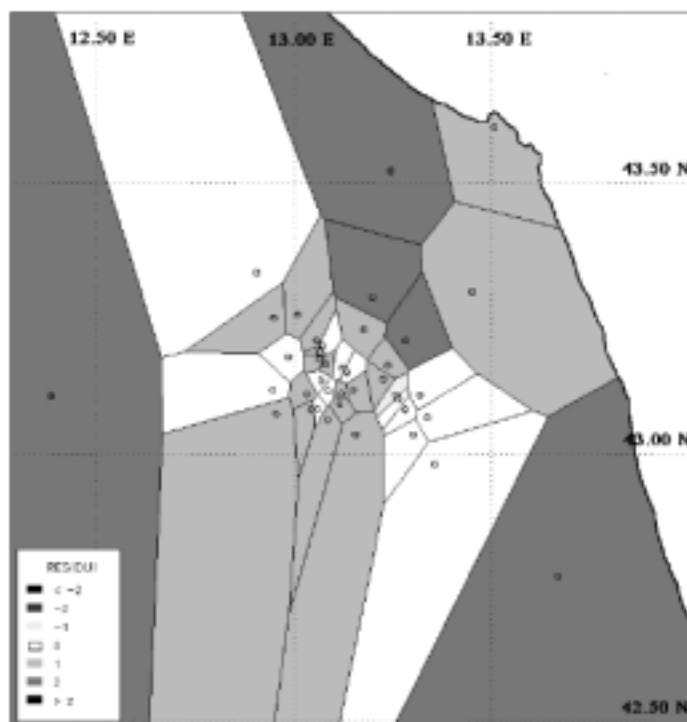


Fig. 10 - Mappa dei residui test V-V tra legge di attenuazione isotropa e dati osservati, relativa al terremoto di Camerino 28.07.1799 - Database DOM4.1.

mach+ a partire dal valore 0.67 da valori di residuo in crescita perché cominciano a diminuire i valori epicentrali. Sono state fatte anche prove su sorgente a rottura unilaterale verso NW, senza successo.

Il risultato migliore è quello presentato in Tab. 4 con  $\Sigma r^2=13$  nei siti coincidente con quello ottenuto dalle inversioni pesate (test V-V).

Le figure 7 e 8 mostrano il piano quotato tassellato e la sintesi migliore. Anche in questo caso si potrebbe citare il successo della simulazione del limite danno/non danno, ma i siti con intensità minore del VI sono solo quattro (di cui solo uno non stimato correttamente in Fig. 8), per cui non si enfatizza tale risultato.

#### 8.4.2 Database CFTI

Come per l'altro catalogo, si è dovuto subito aumentare un po' il momento sismico da  $2.8 \cdot 10^{24}$  ( $M_e=5.6$ ) a valori compresi tra  $2.6 \cdot 10^{25}$  a  $3.2 \cdot 10^{25}$  dyne-cm (step= $1 \cdot 10^{24}$ ): di questa analisi le figure non vengono presentate.

Come nel caso precedente, è stata poi seguita una serie di inversioni senza vincoli sui parametri angolari, con largo passo di campionamento, ottenendo subito residui bassi:  $\Sigma r^2=21$  per strike= $140^\circ$  e  $150^\circ$ , rake= $230^\circ$  e  $60^\circ$ , dip= $50^\circ$ , h=8 km e  $M_0$  attorno a  $2.9 \cdot 10^{25}$  dyne-cm;  $\Sigma r^2=20$  per strike= $285^\circ$ , rake= $310^\circ$ , dip= $60^\circ$ , h=8 km e  $M_0 \sim$

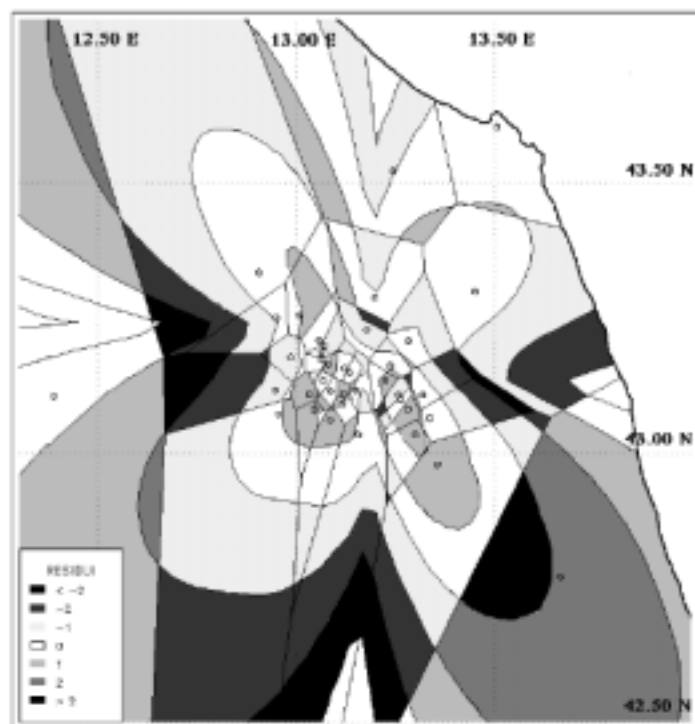


Fig. 11 - Mappa dei residui test C-V tra sintesi migliore KF e dati osservati, relativa al terremoto di Camerino 28.07.1799 - Database DOM4.1.

$3.0 \cdot 10^{25}$  dyne·cm.

Come si vede, da questi tentativi la soluzione con immersione verso NW è di poco migliore dell'altra. Successivamente però, stringendo i range dei parametri attorno ai valori delle due soluzioni citate, e usando combinazioni delle coordinate e dei mach, la soluzione ottimale ha mostrato di convergere verso il meccanismo con immersione verso SW, con  $\Sigma r^2=13$ , come riportato in Tab. 5. Come detto il simbolo // in tabella sta indicare scarsa sensibilità del modello a quel certo parametro.

Si fa notare che la somma dei residui quadratici e in valore assoluto coincidono; questo significa che tutti gli scarti tra siti sono di 1 grado soltanto. Si tratta quindi di un'ottima soluzione, la migliore ottenibile con dati di intensità in cui l'incertezza di 1 grado nelle osservazioni pare scontata.

Merita di essere notata la buona stabilità delle soluzioni ottenute con i due diversi data sets (crf. Tabb. 4 e 5).

La Tab. 6 mostra infine il confronto delle analisi dei residui tra la sintesi scelta dalla Tab. 4, relativa al database DOM4.1 e la legge di attenuazione per la ZS 47, secondo i parametri scelti da Peruzza (1996) sulla legge di Grandori et al. (1987). La legge isotropa usata, è stata generata con  $I_0=IX$ , come da catalogo NT4.1. Il database DOM4.1 fornisce il valore massimo osservato  $I_x=IX-X$ . Come detto, ai fini della inversione dei dati macrosismici mediante la KF, abbiamo scelto di non usare gradi intermedi, che vengono arrotondati al grado superiore. Perciò nel caso specifico



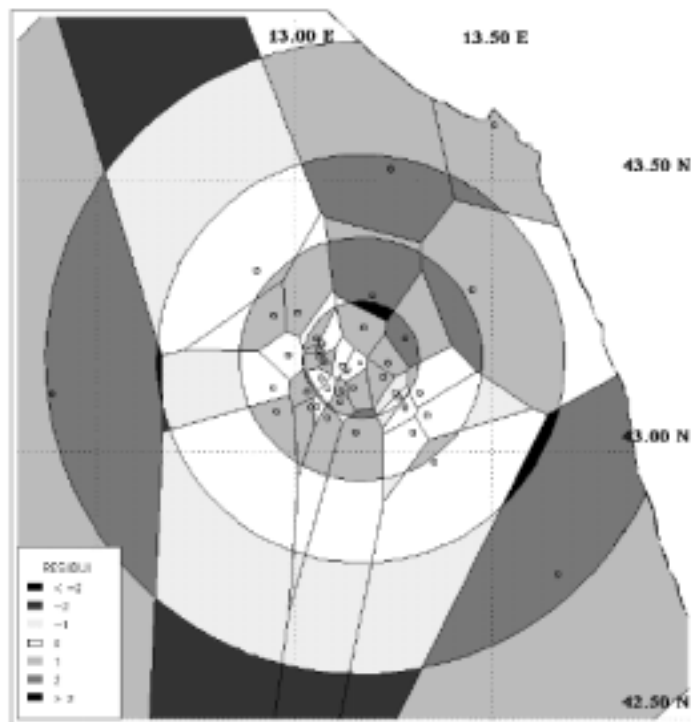


Fig. 12 - Mappa dei residui test C-V tra legge di attenuazione isotropa e dati osservati, relativa al terremoto di Camerino 28.07.1799 - Database DOM4.1.

avremmo forse dovuto usare una intensità di X grado; tuttavia, il prodotto generato da  $I_0=X$  sovrastima le intensità con residui troppo alti per essere ragionevole; da ciò la conferma di  $I_x=IX$  dal NT4.1.

Dalla Tab. 6 emerge un contrasto fra risultati dei test V-V e C-V, che ci obbligherebbe a ripetere l'esposizione già contenuta in Pettenati et al. (1999). Il test tradizionale sui siti puntuali ed il V-V (Figg. 9 e 10) mostrano nettamente il miglior adattamento ai dati osservati da parte della nostra sintesi, mentre il test C-V, sarebbe leggermente a favore della legge isotropa soprattutto alle maggiori distanze verso Sud (Figg. 11 e 12). In sintesi è dubbio se la spiegazione vada ricercata nei minimi che la KF produce nelle quattro direzioni cardinali dall'epicentro della Fig. 11, oppure viceversa, se il test C-V non sia utilizzabile per le inversioni per problemi di mancato rispetto del principio di Nyquist da parte della ubicazione (densità insufficiente) dei siti osservati. I test *Acf* e *Anm*, confermano i residui puntuali parziali per intensità, ma dalla loro lettura si possono ricavare ulteriori indicazioni. Nessuna delle sintesi proposte sui due cataloghi raggiunge il grado massimo (IX-X). La legge isotropa sembra predire meglio il grado 9 (test puntuali e *Acf*), ma il test *Anm* testimonia una sovrastima di tale intensità su un'area più grande. Lo stesso discorso vale per il grado 8, la cui distribuzione è sintetizzata meglio dalla KF, e l'alto valore di *Anm* è dovuto alla stima errata del solo sito posto subito a SE della zona mesosismica. I gradi VII e V, sono pressoché stimati correttamente dalla KF, mentre i test *Anm* per i gradi VI e IV sono

corrotti dal citato sito di Civitella del Tronto. La legge isotropa non riesce a stimare i due gradi più bassi, fermandosi al VI grado.

## 8.5 Conclusioni

Abbiamo espresso risultati e soprattutto dubbi in modo più esteso di quanto si faccia usualmente in articoli a stampa. I dettagli tecnici sulle inversioni sono stati documentati anche per far vedere che non è stato lasciato nulla di intentato. Le sintesi proposte per i due terremoti sono compatibili con le informazioni tettoniche proposte dalla letteratura (es.: Lavecchia et al., 1994). L'evento di Fabriano mostra un movimento strike-slip secondo una direzione all'incirca NE-SW. La direzione NE-SW è un po' ruotata verso E rispetto all'allineamento segnalato dalla tettonica. Si tenga comunque presente che difformità di questo ordine sono comunissime anche in soluzioni dei piani focali dedotte da misure sismografiche relative a scosse avvenute in sequenza sulla stessa struttura. L'evento di Camerino viene risolto con un movimento misto (strike/dip-slip) di tipo appenninico (strike per NW-SE, con immersione verso SW).

Nonostante la sequenza di terremoti, succedutisi dal 1727 al 1815 nelle zone sismogenetiche interessate dal presente studio, i buoni risultati delle sintesi dei due terremoti sostengono l'ipotesi che le intensità rilevate non sono inquinate da danni preesistenti né da scosse multiple.

Il confronto con le leggi di attenuazione ha dato risultati interessanti. Un precedente paragone con 5 terremoti californiani, di meccanismo dip-slip, indica che la legge isotropa fornisce stime medie di qualità paragonabile a quelle ottenute con un metodo che tiene conto della lunghezza della sorgente, della radiazione, e della direttività come la funzione KF. Questo è confermato in parte anche dal terremoto di Camerino. La legge isotropa invece fallisce per meccanismi di tipo strike slip, come nel caso di S. Francisco, 1906, Fabriano o della Sicilia Sud Orientale (Sirovich, 1996; Sirovich and Pettenati, 1999). Questo è dovuto probabilmente all'accentuato effetto della lunghezza della faglia e della direttività nella radiazione da rotture strike-slip di magnitudo non piccola; fenomeni difficilmente simulabili con leggi circolari.

Confrontando i valori degli errori dati dal bootstrap, per i due terremoti studiati, si può dedurre che l'algoritmo KF sembra piuttosto robusto. Tali errori restano infatti su range pressoché simili sugli stessi parametri, mentre i limiti dati dalla sensibilità aumentano nell'evento che contiene il numero di siti più basso. (Si ricorda che il citato metodo che misura la sensibilità, in pratica calcola l'errore che l'algoritmo commette su una incertezza di 2 gradi di intensità nel dato osservato; ed è quindi intrinsecamente cautelativo). Il bootstrap invece cerca di calcolare l'incertezza dei parametri assumendo come ipotesi che la distribuzione di probabilità delle misure scelte a caso dalle infinite possibili misure di un fenomeno valga anche per l'insieme differenza dei finiti parametri calcolati meno i parametri veri (sconosciuti). La funzione KF appare promettente per invertire piani quotati di intensità.

## Bibliografia

- Barnett V. and T. Lewis (1978): *Outliers in statistical data*. Wiley series in probability and mathematical statistics-applied, John Wiley and Sons, Chichester, 355 pp.
- Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. e G. Valensise (1995): *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*. Istituto Nazionale di Geofisica - SGA, Bologna, 973 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>.
- Grandori G., Perotti F., Tagliani A. (1987): On the attenuation of macroseismic intensity with epicentral distance. In: (Cakmak Ed.) *Ground Motion and Engineering Seismology*. 3rd Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng., Princeton USA, Elsevier, Amsterdam, 581-594.
- Lavecchia G., Brozzetti F., Barchi M., Menichetti M and J.V.A. Keller (1994): Seismotectonic zoning in east-central Italy deduced from an analysis of the Neogene to present deformations and related stress fields. *Geological Soc. American Bulletin*, **106**, 1107-1120.
- Monachesi G. e M. Stucchi (1997): *DOM4.1 Un database di osservazioni macrosismiche terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno*. Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/DOM/home.html>
- Pettenati, F., Sirovich, L., and F. Cavallini (1999): Objective Treatment, and Synthesis of Macroseismic Intensity Fields Using Tessellation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 1203-1213.
- Peruzza L. (a cura di) (1996): Modalità di attenuazione dell'intensità macrosismica. GNDT, Rapporto sintetico per il GdL "Rischio Sismico". Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/home.html>.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. and B.P. Flannery (1992): *Numerical recipes. The art of scientific computing, second edition*. Cambridge University Press, 963 pp.
- 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 (1999): Note di commento sulla zonazione sismogenetica ZS4 e di introduzione agli obiettivi del progetto 5.1.1. GNDT, Rapporto interno, Internet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P511/NoteWorkshop.html>
- Sirovich L. (1996): A simple algorithm for tracing out synthetic isoseismal. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1019-1027.
- Sirovich, L. (1997): Synthetic isoseismals of three earthquakes in California-Nevada. *Soil Dyn. Earth. Eng.*, **16**, 353-362.
- Sirovich, L. and F. Pettenati (1999): Seismotectonic outline of South-Eastern Sicily: an evaluation of available options for the scenario earthquake fault rupture. *J. Seism.*, **3**, 213-233.
- Stover C.W. and J.L. Coffman (1993): *Seismicity of the United States, 1568-1989 (revised)*. U.S. Geological Survey professional paper 1527.