

# **Analisi su base fenomenologica del livello di interdipendenza fra le sorgenti sismogeniche del territorio italiano, stime speditive di “completezza” e valutazioni “robuste” dei tassi di sismicità**

*D. Albarello*

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Siena (e-mail: [dario@ibogfs.df.unibo.it](mailto:dario@ibogfs.df.unibo.it))*

## **Riassunto**

Mediante un approccio statistico “robusto” è stata sottoposta a verifica l’ipotesi di indipendenza fra l’attività sismica medio alta ( $I_0 \geq VI$ ) di zone sismogeniche del territorio italiano. A questo scopo è stata necessaria la preliminare messa a punto di una procedura ripetibile per la individuazione dell’intervallo temporale per il quale la copertura informativa assicurata dal catalogo potesse ritenersi “completa” almeno in prima approssimazione. La metodologia infine messa a punto, oltre a permettere una prima definizione degli intervalli temporali coperti in modo affidabile dal catalogo sismico disponibile, permette anche una stima dei tassi di sismicità capace di tenere conto dell’intera storia sismica disponibile e del diverso livello di attendibilità del catalogo nelle sue varie parti. Sulla base dei risultati dell’analisi di completezza, è stata individuata una zona (Appennini Meridionali) ed un intervallo temporale (1860-1990) adatto alla sperimentazione di una strategia di analisi statistica della sismicità basata sull’impiego delle catene di Markov volta alla individuazione di possibili regolarità nell’attività sismica delle zone sismogeniche nell’area indagata. Questa analisi ha permesso di individuare una dipendenza statisticamente significativa fra le attivazioni sismiche delle diverse zone sismogeniche indagate. Questo risultato, che allo stato attuale non può essere utilizzato per la messa in opera di particolari strategie di previsione a medio termine, solleva dei dubbi sull’attendibilità delle attuali stime di pericolosità sismica basate sull’ipotesi di indipendenza dell’attività sismica delle diverse zone sismogeniche.

## **1 Introduzione**

I diversi metodi per la stima del livello di pericolosità dell’area italiana (sia quelli tradizionali alla Cornell che quelli “innovativi”) sono basati sull’assunzione che le diverse zone sismogeniche definite per l’area italiana siano fra loro fisicamente indipendenti per quanto riguarda il meccanismo di generazione dei terremoti. Sulla base di questa assunzione, la pericolosità sismica di un sito è la semplice somma dei contributi delle diverse sorgenti allo scuotimento atteso localmente. In questo contesto, l’eventuale presenza di fenomeni di interdipendenza fra le diverse sorgenti può rendere inaccettabile questa metodologia rendendo meno affidabili le stime prodotte. Diventa quindi importante validare questo tipo di assunzione soprattutto alla luce di diversi risultati teorici ed evidenze fenomenologiche sulla presenza di fenomeni di interdipendenza fra sorgenti sismogeniche sia

a scala locale (p.es., Belardinelli et al., 1999) che a scala regionale (p.es., Mantovani et al., 1997; Mantovani e Albarello, 1997).

Scopo di questo lavoro è stata la messa a punto di una metodologia di analisi “robusta” (ovvero poco sensibile ad assunzioni di difficile validazione sulle proprietà statistiche della sismicità) per la individuazione su base fenomenologica di eventuali fenomeni di interdipendenza fra le attivazioni delle diverse zone sismogeniche dell’area Italiana. L’applicazione di queste metodologie di analisi richiede però una stima preliminare dell’intervallo temporale per il quale il catalogo sismico utilizzato possa essere considerato rappresentativo della sismicità (“completezza”). Questa stima gioca un ruolo essenziale in qualunque tentativo di analisi su base statistica della sismicità inclusi quelli dedicati alla stima della pericolosità sismica

Il lavoro si è quindi articolato in due fasi. Nella prima è stata messa a punto una metodologia statistica volta ad una definizione speditiva del livello di rappresentatività del catalogo sismico disponibile. Come sottoprodotto di questa analisi viene anche proposta una metodologia “robusta” per una valutazione del tasso di sismicità capace di tenere conto dell’intera storia sismica disponibile e del diverso livello di attendibilità del catalogo nelle varie epoche. Nella seconda, è stata messa a punto una metodologia di analisi statistica basata sull’impiego delle “Catene di Markov” che, applicata al periodo coperto in modo apparentemente “completo” dal catalogo disponibile, permettesse una valutazione quantitativa del livello di confidenza associato all’ipotesi di indipendenza fra l’attivazione sismica di sismogeniche tettonicamente connesse. Una prima applicazione di questa metodologia è stato quindi tentata considerando alcune zone sismogeniche nell’area dell’Appennino Meridionale.

## **2 Analisi di “completezza”**

In generale, il livello di attendibilità associato ad un dato catalogo sismico dovrebbe essere giudicato sulla base di una indagine storiografica basata sull’analisi delle fonti documentarie utilizzate. Tuttavia, una indagine di questo tipo, per la sua complessità, non è stata ancora condotta in modo esaustivo per l’area Italiana. D’altro canto, la necessità di fornire stime affidabili del livello di pericolosità sismica su base statistica, richiede valutazioni almeno di tipo preliminare del livello di “completezza” associato ad un dato catalogo sismico. Infatti, Le procedure di calcolo della pericolosità sismica utilizzate finora per l’area italiana dipendono criticamente dalla valutazione tassi di sismicità relativi alle varie zone sismogeniche per le diverse classi di magnitudo considerate. In generale, dato un catalogo sismico ed una fissata classe di magnitudo (o intensità), sono possibili N valutazioni del tasso di sismicità  $S(T_i)$  diverse a seconda della data iniziale  $T_i$  del catalogo considerato completo. Per esempio, in Figura 1 viene mostrato l’andamento del tasso di sismicità apparente relativo all’intera area italiana per  $M_s \geq 5.0$  (Catalogo NT) in funzione della diverse scelte dell’anno iniziale del catalogo considerato.

L'andamento in figura suggerisce come differenze anche del 100% possano essere il risultato di scelte diverse dell'intervallo di catalogo assunto rappresentativo della sismicità. Risulta anche evidente come, per effetto di un peggioramento del livello di copertura del catalogo disponibile, l'impiego di periodi estesi all'indietro del tempo porti a stime del tasso di sismicità sistematicamente decrescenti.

Naturalmente, a ciascuna possibile stima del tasso di sismicità (e della relativa valutazione di pericolosità) sarà possibile associare un diverso livello di attendibilità funzione del livello di rappresentatività del catalogo ("Completezza") associato l'intervallo prescelto. Questo può essere rappresentata in forma di un valore di probabilità  $P(T_i)$  che rappresenta il livello di verosimiglianza assegnato alla proposizione: "a partire da  $T_i$  il catalogo sismico è considerato rappresentativo della sismicità effettiva". Allo scopo di effettuare una valutazione speditiva di questa probabilità è necessaria la messa a punto di una procedura quantitativa capace di fornire una valutazione ripetibile del livello di completezza che deve poi trovare una giustificazione fondata su considerazioni di tipo storiografico.

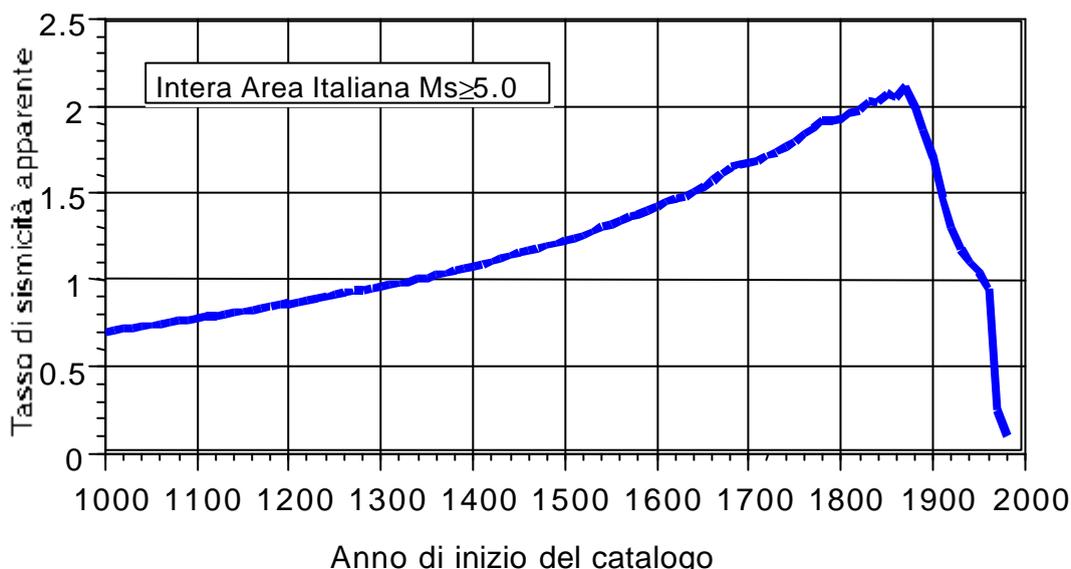


Fig. 1 - Tassi medi calcolati considerando la sismicità apparente contenuta nel catalogo NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997) nel periodo compreso fra dall'anno riportato in ascissa ed il 1990.

La procedura utilizzata a questo scopo deve:

- risultare il più possibile indipendente da particolari modelli di sismicità (carattere non-parametrico);
- consentire un impiego anche su cataloghi "poveri" di eventi;
- fornire risultati formalmente integrabili in procedure di tipo quantitativo dedicate alle stime di pericolosità sismica

Questi requisiti sembrano essere soddisfatti dalla procedura descritta da Albarello (1993) e Martinelli e Albarello (1997) basata sulla sola assunzione che il processo fisico

responsabile dei terremoti sia stazionario. Su questa base, la procedura permette di valutare la probabilità  $P(T_i)$  che il catalogo disponibile possa essere considerato “completo” per una data classe di magnitudo a partire dalla data  $T_i$ . Questa valutazione può essere effettuata per diversi valori di  $T_i$ . La funzione  $P$  che definisce il diverso livello di affidabilità del catalogo in funzione di  $T_i$  (“Funzione di Completezza”) può essere utilizzata per valutazioni comparative delle diverse possibili scelte dell’intervallo da utilizzare per le stime del tasso di sismicità. Può inoltre essere facilmente combinata (utilizzando per esempio un formalismo Bayesiano) con analoghe funzioni di completezza dedotte a partire da considerazioni di tipo storiografico.

Un esempio di applicazione della metodologia è riportato nella Figura 2 dove sono riportati i valori della probabilità  $P(T_i)$  calcolati al variare di  $T_i$  utilizzando il catalogo NT4.1.1 relativo ai terremoti con  $M_s \geq 5$  dell’area Italiana.

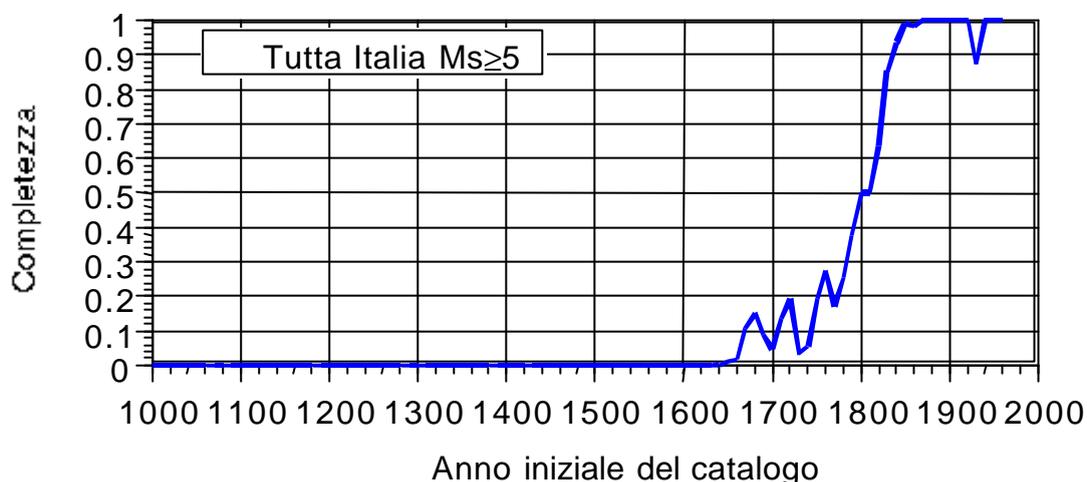


Fig. 2 - Andamento della funzione di completezza  $P(T_i)$  che associa ad ogni possibile scelta  $T_i$  dell’inizio del catalogo il relativo livello di confidenza nell’ipotesi di “completezza”

Si nota un chiaro decremento della funzione di completezza per valori di  $T_i$  precedenti il 1800. È importante osservare che la funzione di completezza fornisce valori piccoli ma non nulli anche per scelte dell’intervallo di completezza apparentemente poco plausibili (p.es.  $T_i < 1700$ ). In realtà questo risultato esprime la consapevolezza che una scelta di  $T_i$  effettuata sulla base di sole analisi statistiche può essere assai meno verosimile di un’altra ma mai certamente sbagliata.

Un primo possibile utilizzo della funzione di completezza  $P(T_i)$  è la scelta di un particolare valore di  $T_i$  per il quale l’ipotesi di completezza risulti validata in modo ritenuto soddisfacente ( $P(T_i) > P_0$ ). In questo caso, il livello di fiducia associato alle stime del tasso di sismicità sarà dato dal valore di  $P_0$  prescelto. Va sottolineato comunque che qualunque scelta del valore di  $T_i$  comporta il sacrificio di tutte le informazioni relative alla sismicità precedente  $T_i$ .

## **2.1 Stime “robuste” dei tassi di sismicità**

Dagli esperimenti effettuati emerge come la funzione P assuma solitamente valori crescenti per valori di  $T_i$  di volta in volta più recenti. Tuttavia questo andamento solo raramente è caratterizzato da variazioni tali da consentire una scelta univoca della soglia di completezza. Più spesso, risultano possibili varie scelte caratterizzate da un livelli di affidabilità confrontabili. A questa difficoltà si aggiunge quella legata alla consistente perdita di informazione dovuta all’artificioso troncamento del catalogo con l’esclusione della sua parte più antica giudicata meno “completa”. Tuttavia la stima del tasso di sismicità  $S(T_i)$  richiede una scelta precisa di un intervallo di completezza per il catalogo.

Per superare questi problemi e meglio sfruttare l’intera base informativa disponibile è però possibile un impiego della funzione di completezza  $P(T_i)$  per ottenere stime del tasso di sismicità capaci di valorizzare le informazioni contenute nell’intero catalogo (incluso anche la parte meno “completa” di quest’ultimo) senza rinunciare ad una valutazione del diverso livello di attendibilità relativo alle diverse parti dello stesso. A questo scopo la funzione di completezza  $P(T_i)$  può essere utilizzata per integrare le diverse stime del tasso di sismicità associate alle possibili scelte di  $T_i$  ed ottenere una stima rappresentativa dell’intero spettro di possibilità. In particolare, una stima del tasso di sismicità medio  $S$  per una data classe di magnitudo (o intensità) può essere ottenuta utilizzando la relazione

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S(T_i)P(T_i)}{\sum_{i=1}^N P(T_i)}$$

In pratica, si propone di utilizzare la funzione P, che rappresenta il diverso livello di attendibilità dei diversi possibili sottocataloghi, come funzione peso per una stima del tasso di sismicità che tenga conto di tutte le possibili scelte dell’intervallo di completezza. In questo modo diviene possibile una piena utilizzazione del catalogo sismico pur tenendo in debita considerazione il diverso livello di completezza delle informazioni disponibili nelle varie parti del catalogo.

La ricerca ha messo in evidenza l’effettiva applicabilità di questo algoritmo alle varie parti del territorio italiano per le diverse classi di magnitudo. In particolare è stata analizzata la possibilità di calibrare su insiemi differenti la funzione P (per esempio su aree più estese di quelle sismogenetiche). Questa strategia è stata quindi utilizzata per la stima dei tassi di sismicità utilizzati per la carta di pericolosità sismica del territorio italiano sviluppata dal gruppo di lavoro GNDT-SSN.

## **2.2 Analisi del livello di interdipendenza fra l’attività sismica delle sorgenti sismogeniche**

È stata messa a punto una metodologia volta a controllare l'ipotesi di indipendenza fra le sorgenti sismogeniche a partire da una analisi della sismicità condotta su base statistica. A questo scopo si è scelto un approccio di tipo "robusto" insensibile ai diversi modelli di interdipendenza possibili. Secondo questa metodologia, la probabilità di occorrenza di un evento sismico in una certa zona sismogenica (ZS) è condizionata solo dalla localizzazione dell'evento che la precede nel tempo (catena di Markov). In particolare, a ciascuna occorrenza sismica in una zona  $i$ -ma è possibile associare una probabilità  $P_{ij}$  che l'evento successivo abbia luogo nella zona  $j$ -ma. Le diverse probabilità  $P_{ij}$  possono essere raccolte in una matrice detta delle Probabilità di Transizione (MPT). Sulla base di condizioni molto generali è possibile definire la forma della MPT nell'ipotesi che i terremoti occorrano indipendentemente nelle diverse zone sismogeniche (ipotesi  $H_0$ ). Mediante procedure formalizzate (p.es., Lomnitz, 1967), questa matrice può essere confrontata con quella ottenuta a partire dal catalogo sismico disponibile: la valutazione delle eventuali differenze può permettere o meno di escludere l'ipotesi  $H_0$  ad un definito livello di confidenza. Questo confronto costituisce il punto critico della procedura e deve essere effettuato mediante metodologie molto affidabili: infatti, se da un lato la non esclusione dell'ipotesi  $H_0$  non preclude la presenza di fenomeni di interrelazione più complessi di quelli ipotizzati (catena di Markov) dall'altro la sua esclusione mette in discussione l'ipotesi di indipendenza fra le diverse sorgenti sismogeniche elemento fondamentale per le correnti metodologie di calcolo della pericolosità sismica. A questo scopo è stato quindi utilizzato un algoritmo di valutazione basato su simulazioni numeriche Monte Carlo (Romesburg e Marshall, 1984) che consentono di superare le principali limitazioni delle metodologie correnti.

Una prima applicazione della metodologia messa a punto è stato lo studio della sismicità nell'area dell'Appennino Meridionale (Zone sismogeniche 57, 58, 59, 62, 63 e 64). Sono stati analizzati tutti gli eventi con  $M_s \geq 4.4$  ( $I \geq VII$ ) riportati nel catalogo NT-GNDT dal 1860 al 1990 ed attribuiti alle zone sismogenetiche studiate. La soglia del 1860 per l'intervallo di completezza è stata suggerito dall'analisi della funzione di completezza calcolata seguendo l'approccio descritto sopra. Nell'analisi in questione, la zonazione proposta da Meletti et al. (2000) ed utilizzata come base per il calcolo della pericolosità sismica in Italia (Slejko et al., 1998), è stata utilizzata senza nessun tentativo di revisione critica. Allo stesso modo, per le attribuzioni dei diversi terremoti alle singole aree sismogeniche, sono state utilizzate le indicazioni fornite nel catalogo NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997). La tabella che segue riporta la MTP relativa agli eventi considerati.

In via teorica, i valori in tabella potrebbero consentire di "prevedere" la localizzazione di una scossa "futura" a partire dalla localizzazione della scossa immediatamente precedente o a prevedere la sequenza di attivazioni più probabile. In realtà il numero di eventi analizzati non è sufficiente almeno per ora a vincolare in modo pienamente affidabile le probabilità riportate in tabella al punto da poterle inserire in un affidabile protocollo di "previsione". Il significato dei risultati in tabella è piuttosto quello di

consentire la validazione dell'ipotesi di interdipendenza fra le sorgenti sismogeniche nell'area studiata utilizzando l'algoritmo di valutazione proposto da Romesburg e Marshall. Questo test ha mostrato che la successione di eventi osservata ha una probabilità inferiore o uguale al 5% di essere casuale. In altri termini, dall'analisi emerge una significativa dipendenza della localizzazione di un evento sismico con  $M_s \geq 4.4$  dalla localizzazione dell'evento immediatamente precedente. È importante sottolineare che questo risultato è stato ottenuto utilizzando una zonazione scelta a-priori indipendentemente dalla successione temporale della scosse dell'area e dalla presente analisi.

ZS	57	58	59	62	63	64
57	0.00	0.17	0.17	0.17	<b>0.50</b>	0.00
58	0.09	0.09	0.09	0.18	<b>0.45</b>	0.09
59	0.00	0.33	<b>0.50</b>	0.17	0.00	0.00
62	0.13	0.13	0.00	<b>0.38</b>	<b>0.38</b>	0.00
63	0.13	0.26	0.04	0.04	<b>0.48</b>	0.04
64	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab. 1 – Matrice delle probabilità di transizione relative alle zone sismogenetiche (ZS) dell'Appennino Meridionale. I numeri nelle celle indicano le probabilità che ad un evento con  $M \geq 4.4$  nella ZS il cui numero è riportato all'estremità della riga corrispondente segua un evento nella ZS il cui numero è indicato in cima alla colonna corrispondente. In neretto sono indicati i valori massimi per riga.

Sebbene il catalogo considerato riporti solo scosse principali, si potrebbe sospettare che il risultato ottenuto sia l'effetto di una rimozione inefficace degli aftershocks. In realtà, l'effetto di questi terremoti "indotti" sarebbe quello di rendere massime le probabilità riportate lungo la diagonale della matrice in tabella (successione di eventi nella stessa zona). Come si vede però, solo le zone 59 e 63 presentano una probabilità massima per successioni di eventi nella stessa zona mentre per le altre è massima la probabilità che l'attività sismica "migri" verso altre zone.

Questi risultati implicano che le sorgenti sismogeniche dell'Appennino Meridionale non possono essere considerate indipendenti ai fini di una valutazione della pericolosità sismica. Questo risultato conferma su una base puramente fenomenologica e attraverso un test "robusto" l'ipotesi avanzata da diversi autori (p.es., Mantovani et al., 1997; Belardinelli et al., 1999) sulla possibile interconnessione dinamica fra l'attività delle diverse zone sismogenetiche nell'Appennino Meridionale.

### 3 Conclusioni

Le ricerche condotte hanno consentito la messa a punto e l'applicazione di due metodologie di analisi della sismicità.

La prima permette una valutazione speditiva del livello di rappresentatività del catalogo sismico disponibile. Questa stima è basata sulla sola ipotesi di stazionarietà del

processo sismogenetico e non richiede assunzioni stringenti sulle proprietà statistiche della sismicità. Il risultato della metodologia è una funzione di probabilità che rappresenta il livello di verosimiglianza associato ad ogni possibile scelta dell'anno iniziale del catalogo considerato. La formulazione adottata permette di combinare stime le di completezza dedotte su base statistica con analoghe valutazioni effettuate su base storiografica. Infine può essere utilizzata per effettuare stime dei tassi medi di sismicità che tengono conto dell'intera storia sismica disponibile pesando in modo differenziato le diverse stime condotte a partire da ipotesi diverse sull'intervallo di completezza.

La seconda metodologia riguarda la validazione su base statistica dell'ipotesi di interdipendenza fra le sorgenti sismogenetiche. Anche questa metodologia ha un carattere "robusto" e non richiede assunzioni circa le proprietà statistiche della sismicità. La sua applicazione allo studio della sismicità nell'area degli Appennini Meridionali ha messo in evidenza come l'ipotesi di indipendenza fra l'attività sismica delle diverse sorgenti sismogenetiche di questa regione, ipotesi fondamentale per le stime di pericolosità condotte con metodologie standard, possa essere esclusa con un elevato livello di confidenza.

### **Bibliografia**

- Albarelo D. (1993): Confronto fra i cataloghi sismici GNDT e PFG: differenze nelle valutazioni di stazionarietà e hazard. *Atti del XII° convegno GNGTS-CNR*, 321-329
- Belardinelli M.E., Cocco M., Coutant O., Cotton F. (1999): Redistribution of dynamic stresses during coseismic ruptures: evidence for fault interaction and earthquake triggering. *J.Geophys.Res.*, **104**, 14925-14945
- Camassi R., Stucchi M., (1997): NT4.1.1, un catalogo parametrico di terremoti dell'area italiana al di sopra della soglia di danno, GNDT, Milano, 95 pp., Internet web site <http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html>
- Lomnitz C. (1967): Transition probabilities between seismic regions. *Geophys.J.R.astr.Soc.*, **13**, 387-391
- Mantovani E., Albarello D., Tamburelli C., Babbucci D. (1997): Recognizing the Italian zones most prone to next large earthquakes: possible approaches and present chances. *Ann.Geofis.*, **40**, 5, 1329-1344
- Mantovani E., Albarello D. (1997): Middle-term precursors of strong earthquakes in southern Italy. *Phys. Earth Planet. Int.*, **101**, 49-60
- Martinelli G., Albarello D. (1997): Main constraints for siting of monitoring network devoted to the study of earthquake related hydrogeochemical phenomena in Italy. *Ann.Geofis.*, **40**, 6, 1505-1525
- Meletti C., Patacca E., Scandone P. (2000): Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. *Pure and Appl. Geophys.*, **157**, 11-35
- Romesburg H.C., Marshall K. (1985): CHITEST: a Monte Carlo computer program for contingency table test. *Comp.Geosci.*, **11**, 1, 69-78
- Slejko D., Peruzza L., Rebez A. (1998): Seismic hazard maps of Italy. *Ann.Geofis.*, **41**, 2, 183-214