



**Task 3 – Contributo alla definizione di priorità di
intervento per edifici non adeguati sismicamente**

Deliverable D15

**Valutazioni sperimentali di probabilità di occorrenza
dei terremoti utilizzando metodologie non parametriche
applicate a zonazioni diverse**

Licia Faenza

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Bologna
Institute for Earth Sciences, University of Potsdam, Germany

Potsdam, 15 aprile 2007

Indice

1.	Introduzione	3
2.	La metodologia.....	3
3.	Data set.....	4
3.1.	Le zonazioni	4
3.1.1.	La prima zonazione: griglia geometrica.....	5
3.1.2.	La seconda zonazione: il modello di Cinti et al.	5
3.1.3.	La terza zonazione: il modello ZS9.....	6
3.2.	Il catalogo sismico	8
3.2.1.	Catalogo A: CPTI99 + INGV Bollettino sismico.....	10
3.2.2.	Catalogo B: CPTI04	10
3.3.	Le finestre temporali di completezza della magnitudo.....	10
4.	Prima applicazione: Catalogo A e le 3 zonazioni.....	12
5.	Seconda applicazione: Catalogo B e la zonazione ZS9	13
6.	Terza applicazione: la zonazione ZS9 con diverse soglie di magnitudo	14
7.	Mappe di probabilità di occorrenza.....	15
8.	Analisi della capacità predittiva di MHP.....	18
8.1.	Analisi del Goodness-of-fit	18
8.1.1.	Completezza Storica	18
8.1.2.	Completezza Statistica	19
8.2.	Test retrospettivo su dati indipendenti.....	20
9.	Commenti finali	25
	Bibliografia	25

Riassunto

Nel 2004 è stata pubblicata la nuova mappa di riferimento per l'hazard in Italia (MPS04) quale strumento per la ridefinizione delle zone sismiche. Con lo scopo di definire le aree con priorità di intervento, sono stati eseguiti e confrontati diversi approcci, ponendo particolare attenzione all'analisi della distribuzione spazio-temporale dei forti terremoti, attraverso l'applicazione del Modello di Hazard Proporzionale.

Nello studio statistico dell'occorrenza dei terremoti entrano in gioco diversi fattori, quali il catalogo e la zonazione. Il lavoro presentato si divide in 2 parti. Inizialmente gli stessi elementi di input di MPS04 sono stati analizzati utilizzando il Modello di Hazard Proporzionale, per determinare quanto fattori quali il catalogo dei terremoti, la zonazione sismogenetica e la finestra di completezza temporale del catalogo abbiano influenza sulla probabilità di occorrenza. Successivamente, si è valutata la capacità predittiva del nuovo modello non-parametrico della sismicità, confrontando i risultati con il modello poissoniano, che rappresenta il modello alla base dell'approccio standard per la pericolosità sismica.

I risultati indicano che il *clustering* dei terremoti è la struttura che meglio rappresenta l'occorrenza dei terremoti. Le caratteristiche del *cluster*, in termini di intensità e durata possono cambiare usando i due diversi cataloghi sismici, ma non sono influenzate significativamente dalle tre zonazioni usate nei test.

Abstract

In 2003 a new building code for Italy has been released. Subsequently a new seismic hazard reference map of Italy (MPS04) have been compiled for definition of seismic zones. In order to define priority area for any short-term policy in loss reduction in Italy, different approach have been followed and compared. One of this approach is based on the clustered feature of the earthquake occurrence for events greater than M5.5, according to the Proportional Hazard Model.

The analysis of the distribution of large events is composed by several ingredients. In fact, besides the statistical distribution of events, the catalogue and the zonation play an important role. In this work the same input data used for the MPS04 have been introduced in the model, in order to investigate its sensitivity and the stability of the results and to check the influence into the probability distribution of factors like the catalogues, the zonations and the magnitude-temporal completeness. Then, the predictive ability of this model has been tested and compared to the one of the Poisson distribution, which is used in standard hazard analysis.

The results show the same pattern for earthquake occurrence in all the applications, indicating a cluster properties for earthquake occurrence. The cluster characteristic, in terms of time duration and intensity, may change adopting a different catalogue, but it is not significantly influenced by the three zonations adopted in the test.

1. Introduzione

Nell'ambito dell'analisi della distribuzione spazio-temporale dei forti terremoti, una nuova metodologia statistica è stata applicata alla sismicità in Italia (Faenza *et al.*, 2003; Cinti *et al.*, 2004; Faenza *et al.*, 2004 e Faenza, 2005). Tale metodologia ha evidenziato come il *cluster* sia la struttura predominante nell'occorrenza di forti terremoti per una durata di alcuni anni-decenni.

In questa ricerca si è voluto testare la stabilità di questo risultato rispetto agli elementi di ingresso, in particolare, la zonazione sismica, il catalogo dei terremoti e la finestra spazio-temporale di completezza dello stesso. Lo scopo del lavoro è capire quali siano gli elementi che maggiormente influenzano la probabilità di occorrenza dei forti terremoti. Il modello è stato quindi applicato alla sismicità italiana usando gli stessi elementi di *input* di MPS04 (Gruppo di Lavoro MPS04, 2004), con particolare attenzione al ruolo della zonazione, del catalogo sismico e della finestra temporale di completezza della magnitudo.

Inoltre, la ricerca è volta alla definizione delle aree in cui è maggiore la probabilità che si verifichi un evento con $M_w \geq 5.5$ nei prossimi anni. Lo studio statistico della distribuzione spazio-temporale dei forti terremoti è uno strumento che aiuta la definizione di una strategia per la mitigazione del rischio sismico. Nonostante l'Italia sia caratterizzata da una sismicità di intensità medio-alta, l'elevata densità di popolazione e la qualità degli edifici storici rendono elevato il rischio sismico. Il contributo di questa ricerca a questo delicato problema è quello di fornire previsioni a medio termine e di migliorare la conoscenza della processo fisico della generazione dei terremoti.

2. La metodologia

Il Modello di Hazard Proporzionale (MHP) è stato inizialmente introdotto da Cox (1972) e da Kalbfleisch e Prentice (1980). In questo rapporto sono stati introdotti solo gli elementi di base della strategia, così da rendere comprensibili i principi del MHP, mentre l'approccio tecnico e la formulazione matematica del problema sono già stati descritti in Kalbfleisch e Prentice (1980), Faenza *et al.* (2003) e Faenza (2005), a cui si fa riferimento.

Due sono le principali caratteristiche che rendono MHP innovativo se confrontato con la modellazione statistica tradizionale per l'occorrenza dei terremoti. Il modello è non-parametrico nel dominio temporale. Questo implica che non è stata imposta a priori alcuna dipendenza temporale per la distribuzione dei terremoti. In questo modo si lascia che i dati "parlino da soli". Questo aspetto fa sì che il modello possa essere usato anche come una verifica formale e diretta sulle diverse ipotesi, a volte antitetiche fra loro, per la generazione dei terremoti (Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003). L'altro elemento innovativo di MHP è l'integrazione di diversi fattori (geologici, geofisici e tettonici) nello studio della previsione dei terremoti. In questo modo è possibile integrare le informazioni che provengono da diverse discipline in un unico modello per la distribuzione dei terremoti.

In questo lavoro, lo studio della distribuzione dei grandi terremoti è effettuato attraverso l'analisi della funzione di *hazard*. In statistica, esistono diversi modi per parametrizzare una serie di dati, come la densità di probabilità (p.d.f.), la funzione cumulativa o la funzione di *hazard*. Poiché esiste una relazione biunivoca fra queste funzioni, la funzione di *hazard* descrive in modo univoco il processo puntuale (e.g. Kalbfleisch, 1985; Faenza, 2005); essa rappresenta la probabilità istantanea di avere un terremoto al tempo t , condizionata al fatto che non ci sono stati eventi fino al tempo t . Ha però l'immediato vantaggio che l'analisi della sua dipendenza temporale fornisce indicazioni utili sulla fisica del processo di occorrenza dei terremoti.

Il modello considera due diversi tipi di variabili casuali (RV): i tempi di inter-evento, ovvero il tempo trascorso fra due eventi consecutivi, e il dato *censoring*. Il dato *censoring* è una variabile molto importante; rappresenta il tempo trascorso fra l'ultimo evento in catalogo e la fine del catalogo. Questo tipo di variabile casuale è molto importante negli studi probabilistici di tipo *time-dependent*, dove la probabilità di occorrenza è modificata dal tempo trascorso dall'ultimo evento.

Per la descrizione del MHP, consideriamo un insieme N di RV; per ciascuna di esse esiste un vettore di lunghezza s che contiene qualsiasi tipo di informazione (quantitativa o qualitativa) che possa influenzare l'occorrenza dei terremoti. Dunque per ogni elemento di N , esiste un vettore \vec{z} di dimensione s che racchiude tutte le variabili in grado di spiegare il fenomeno (vettore delle covariate). Il problema principale diventa dunque quello di stabilire una relazione fra la distribuzione temporale delle RV e il vettore delle covariate \vec{z} . Nel MHP, esso viene risolto imponendo una funzione di *hazard*, per un generico tempo t , uguale a :

$$\lambda(t, \vec{z}) = \lambda_0(t) \exp(\vec{z}\vec{\beta})$$

Equazione 1. Funzione di *hazard* per il MHP

in cui $\lambda_0(t)$ è un'arbitraria e non specificata funzione di *hazard base-line* e $\vec{\beta}$ è un vettore colonna di dimensione s rappresentante il peso statistico di ogni elemento del vettore \vec{z} delle covariate. La funzione di *hazard* $\lambda(t, \vec{z})$ è dunque composta da due elementi, uno che include la dipendenza temporale ($\lambda_0(t)$) e l'altro che include tutte le informazioni relative al processo fisico in esame portate da altri fattori ($\exp(\vec{z}\vec{\beta})$).

I due parametri che devono essere stimati sono il vettore dei coefficienti $\vec{\beta}$ e $\lambda_0(t)$; sono stimati usando il criterio di massima verosimiglianza, *Maximum Likelihood Estimation* (per dettagli si fa riferimento a Faenza *et al.*, 2003; Faenza, 2005).

Nel nostro modello, la funzione di *hazard base-line* $\lambda_0(t)$ non dipende da \vec{z} e dunque è identica per tutte le aree, mentre gli elementi di \vec{z} possono cambiare. Da un punto di vista fisico questo implica che il meccanismo di generazione dei terremoti è assunto essere lo stesso in tutte le aree, ma le sue caratteristiche possono essere riscalate in base ad un fattore moltiplicativo, poiché nell'equazione 1 le covariate agiscono moltiplicativamente sulla $\lambda_0(t)$. Vogliamo anche rimarcare che nel nostro modello viene assunto che i terremoti avverranno nelle stesse aree in cui sono avvenuti in passato e che la copertura spazio-temporale fornita dal catalogo è rappresentativa della distribuzione spazio-temporale degli eventi.

3. Data set

Per quantificare quali siano gli elementi che maggiormente influenzano la distribuzione dei terremoti, il MHP è stato applicato a tre diverse zonazioni, a due cataloghi sismici e a diverse finestre temporali di completezza del catalogo.

3.1. Le zonazioni

La distribuzione spaziale degli eventi è stata studiata attraverso tre zonazioni. Usando tre diversi modelli spaziali di zonazione si è voluto studiare quale sia l'impatto di tale scelta sullo studio della distribuzione dei terremoti e di conseguenza sulla probabilità di occorrenza degli eventi futuri. Questo è un aspetto particolarmente delicato. Il dominio spaziale è sicuramente uno dei punti deboli del MHP. Il modello usa, infatti, come RV i tempi di inter-evento e i dati *censoring*. Tali variabili devono però essere definite all'interno di una zona. La definizione dei margini delle zone, d'altra parte, non corrisponde a nessun limite fisico reale; oltretutto, la definizione di bordi rigidi porta

alla scelta dicotomica dell'appartenenza o meno di un evento ad una zona. In questo modo, i valori di probabilità subiscono un salto di valore istantaneo e non giustificabile dal punto di vista sismotettonico. Questo è un problema molto importante per gli studi di probabilità di evento e di pericolosità sismica, ed è tipico di tutti gli approcci che usano i tempi di inter-evento e le zonazioni sismiche. Questa ricerca è un primo studio per cercare di quantificare l'impatto delle zonazioni sullo studio di probabilità di evento.

3.1.1. La prima zonazione: griglia geometrica

La prima griglia è stata applicata in Faenza *et al.* (2003) ed è stata costruita su basi puramente geometriche. Su una griglia $13^{\circ} \times 13^{\circ}$ che copre il territorio italiano, sono state definite le aree tracciando per ogni nodo della maglia un cerchio con un raggio di 70 km. In questo modo sono state definite 169 zone circolari. Poiché la zonazione è puramente geometrica, le aree non sono caratterizzate da alcun fattore geologico o tettonico. Dunque il vettore delle covariate, in questo caso specifico, è un vettore a 2 dimensioni, composto i) dal logaritmo naturale del tasso di occorrenza della zona, inteso come numero medio di eventi nell'unità di tempo; ii) dalla magnitudo dell'evento da cui viene calcolata la RV, sia nel caso di tempi di inter-evento sia nel caso di dati *censoring*.

3.1.2. La seconda zonazione: il modello di Cinti et al.

La seconda zonazione che viene applicata è il risultato del lavoro di Cinti *et al.* (2004). La figura 1 mostra la zonazione sismogenetica costruita sulla base di dati di *stress* attivo quali i *borehole breakouts*, i meccanismi focali e le faglie sismogenetiche (per dettagli si fa riferimento a Cinti *et al.*, 2004). Il modello è composto da 61 aree omogenee al loro interno rispetto al regime tettonico e all'orientazione del campo di stress. Correlata alla zonazione, è stata predisposta una serie di parametri che la caratterizzano e che compone il vettore delle covariate. Nel dettaglio, il vettore \vec{z} è composto da 7 elementi: i) il logaritmo naturale del tasso di occorrenza della zona, inteso come numero medio di eventi nell'unità di tempo; ii) la magnitudo dell'evento da cui viene calcolata la RV; iii) il regime tettonico prevalente dell'area; iv) l'omogeneità dell'orientamento del campo di stress; v) il numero delle faglie sismogenetiche nella zona; vi) l'omogeneità della topografia e vii) l'estensione della zona, in km^2 .

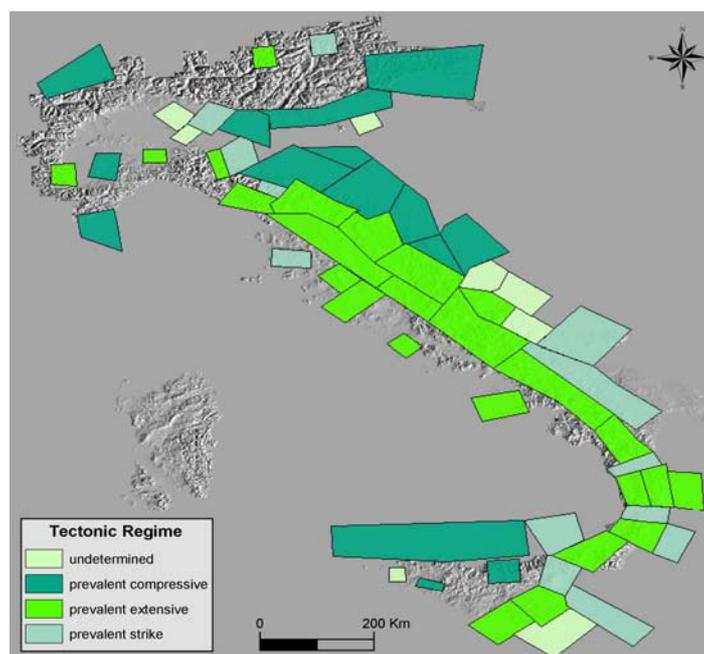


Figura 1. Zonazione sismotettonica da Cinti et al., 2004.

3.1.3. La terza zonazione: il modello ZS9

La zonazione ZS9 (figura 2) è uno degli elementi di input di MPS04 (Gruppo di Lavoro MPS04, 2004). La realizzazione della zonazione è basata su un modello cinematico di riferimento per il Mediterraneo centrale, sulle evidenze che emergono dai più recenti studi di tettonica attiva e sulla individuazione delle sorgenti sismogenetiche (tra i quali il Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M5.5 in Italy, DISS 2.0, Valensise e Pantosti, 2001) e sul catalogo dei terremoti CPTI04 (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004). ZS9 è composta di 36 aree poligonali, caratterizzate da comportamento tettonico e cinematico omogeneo e definite principalmente per l'utilizzo con metodi convenzionali di valutazione in termini probabilistici della pericolosità sismica. Anche ZS9 è corredata da una serie di informazioni geologiche e tettoniche in grado di caratterizzare ogni zona; in dettaglio il vettore delle covariate è composto da: i) il tasso di occorrenza della zona, inteso come numero medio di eventi nell'unità di tempo; ii) la magnitudo dell'evento da cui viene calcolata la RV; iii) il regime tettonico prevalente dell'area; iv) la profondità media dei terremoti e v) l'estensione della zona, in km² (per il dettaglio si veda la tabella 1).

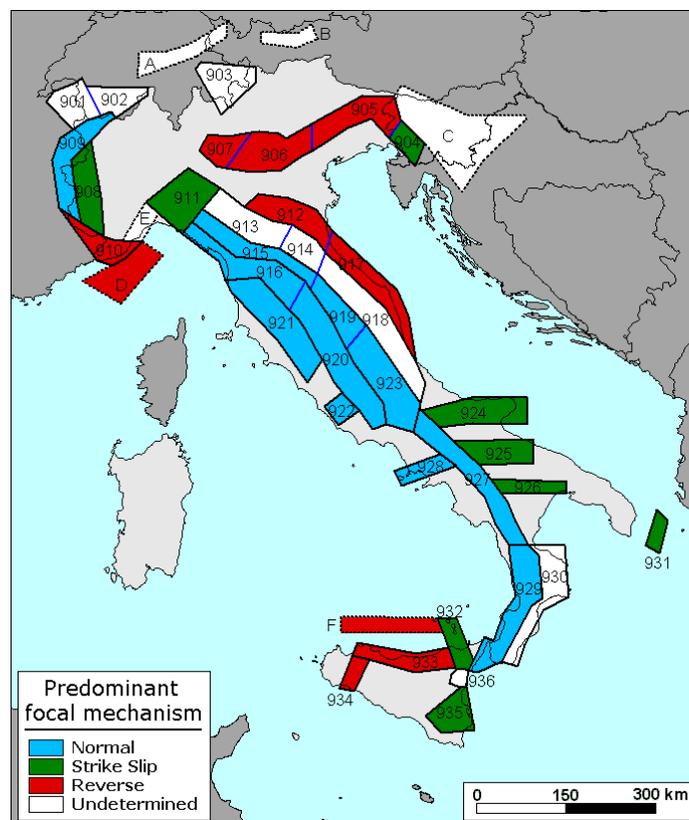


Figura 2. Zonazione sismogenetica ZS9 e meccanismo focale prevalente atteso nelle zone (da Meletti et al., 2007).

In generale, per la definizione dei parametri sono stati usati i valori forniti da MPS04. Per quanto riguarda la definizione dello stile tettonico prevalente di ogni area, invece, sono state applicate quattro diverse parametrizzazioni. Una consiste nella definizione fornita da MPS04, come mostrato in figura 2 e nella colonna 5 della tabella 1; le altre tre provengono da diverse elaborazioni delle informazioni contenute nel database dei meccanismi focali del Mediterraneo (Vannucci et al., 2004) e loro rappresentazione con i diagrammi di Frohlich (Frohlich, 2001).

La Figura 3 mostra per ogni zona di ZS9 il meccanismo focale prevalente, calcolato come la somma dei tensori momento di tutti gli eventi avvenuti dentro l'area in esame (Kostrov, 1974). Il rake del tensore momento somma di ogni zona è usato per classificare il regime tettonico, come mostrato in tabella 1, colonna 6.

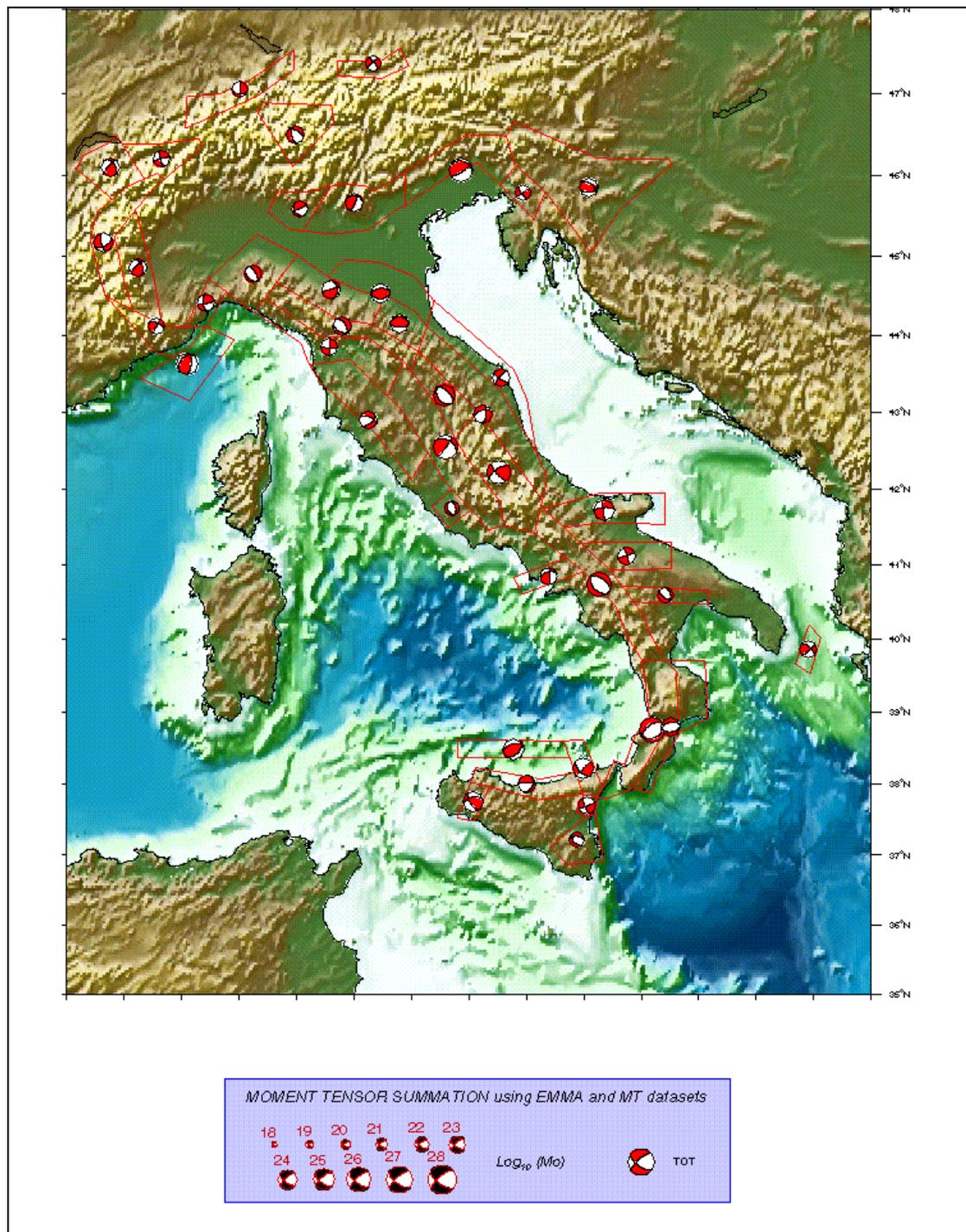


Figura 3. Meccanismo focale prevalente per le zone di ZS9 (elaborazione sulla base dei dati contenuti nel database Emma, Vannucci et al., 2004).

Un modo alternativo di rappresentare il regime tettonico di un'area è attraverso l'uso dei diagrammi di Frohlich (Frohlich, 2001). In figura 4 la palette lega in modo univoco il regime tettonico ad un codice di colori (Serpelloni *et al.*, 2005). Le due mappe nelle figure 3 e 4 sono la rappresentazione con tecniche diverse degli stessi dati e suggeriscono letture differenti in quanto evidenziano aspetti diversi. Sulla base di questi risultati, il regime tettonico prevalente dell'area è stato raggruppato di 2 diversi modi: in 3 classi, come in MPS04 (colonna 7 di tabella 1), e in 5 classi (colonna 8 di tabella 1).

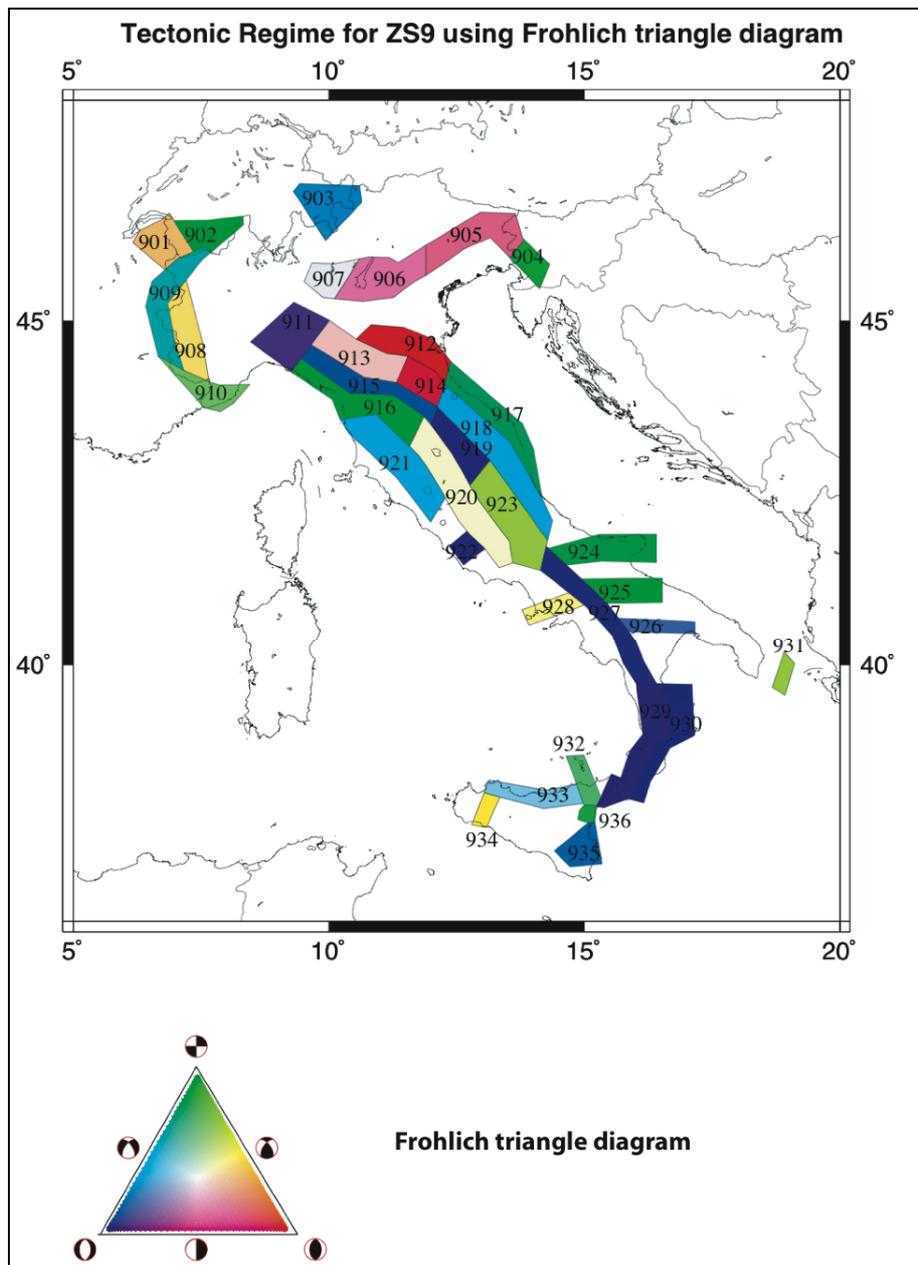


Figura 4. Rappresentazione dello stile tettonico principale per le zone di ZS9 usando i diagrammi di Frohlich (Frohlich, 2001).

3.2. Il catalogo sismico

L'ingrediente fondamentale per la "previsione" della sismicità futura viene dallo studio statistico della sismicità passata, attraverso l'analisi dei cataloghi sismici. In questo lavoro, sono stati confrontati i cataloghi CPTI99 (Gruppo di Lavoro CPTI, 1999; disponibile all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI99/>), integrato con il Bollettino sismico INGV (INGV-CNT Bollettino Sismico; disponibile all'indirizzo <http://ftp.ingv.it/bollet>), e CPTI04 (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; disponibile all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>).

ZS	Prof. (km) ^{a)}	superf. (km ²) ^{a)}	bordi morbidi (km) ^{a)}	mec. focale ^{a)}	rake del tensore momento ^{b)}	nuova class. mec. foc. in 3 classi ^{b)}	nuova class. mec. foc. in 5 classi ^{b)}
901	8	4171.9	5	undet	128.6°	reverse	trans-pressive
902	10	3423.2	5	undet	-167.6°	strike-slip	strike-slip
903	9	5190.6	5	undet	-52.6°	normal	trans-tensive
904	7	2155.6	3	strike-slip	-14.5°	strike-slip	strike-slip
905	8	6625.4	10	reverse	72.1°	reverse	reverse
906	8	6922.1	10	reverse	71.6°	reverse	reverse
907	8	2953.9	10	reverse	-124.1°	normal	normal
908	10	5268.3	5	strike-slip	134.0°	reverse	trans-pressive
909	10	6414.0	5	normal	-145.7°	strike-slip	trans-tensive
910	10	3692.4	8	reverse	32.1°	strike-slip	strike-slip
911	8	6601.1	8	strike-slip	-81.8°	normal	normal
912	7	5634.6	3	reverse	88.3°	reverse	reverse
913	13	6435.4	0	undet.	121.1°	reverse	reverse
914	13	3188.7	5	undet.	90.5°	reverse	reverse
915	8	5927.3	0	normal	-67.7°	normal	normal
916	6	7819.9	5	normal	-11.0°	strike-slip	strike-slip
917	7	6962.6	3	reverse	-21.6°	strike-slip	trans-tensive
918	13	10164.1	0	undet.	-138.7°	normal	trans-tensive
919	8	4203.4	0	normal	-96.4°	normal	normal
920	6	11217.1	5	normal	51.5°	strike-slip	trans-pressive
921	4	9630.2	1	normal	-41.0°	normal	trans-tensive
922	4	1606.6	1	normal	-95.6°	normal	normal
923	9	9222.9	0	normal	151.7°	strike-slip	trans-pressive
924	13	6860.9	5	strike-slip	-19.4°	strike-slip	strike-slip
925	13	4520.9	5	strike-slip	173.6°	strike-slip	strike-slip
926	13	2513.8	3	strike-slip	-114.7°	normal	normal
927	10	8336.3	0	normal	-97.4°	normal	normal
928	3	2527.5	3	normal	45.2°	strike-slip	trans-pressive
929	10	9077.1	0	normal	-93.9°	normal	normal
930	10	6991.9	3	undet.	-82.4°	normal	normal
931	10	1439.5	5	strike-slip	28.9°	strike-slip	trans-pressive
932	13	2682.6	5	strike-slip	-30.4°	strike-slip	strike-slip
933	10	4830.9	5	reverse	-52.4°	normal	trans-tensive
934	10	1602.9	5	reverse	140.8°	reverse	trans-pressive
935	13	3959.5	10	strike-slip	-119.2°	normal	normal
936	3	771.0	1	undet.	-19.6°	strike-slip	strike-slip

Tabella 1. Parametri di ZS9. a) da Gruppo di lavoro MPS, 2004; b) nuova analisi del presente lavoro

3.2.1. Catalogo A: CPTI99 + INGV Bollettino sismico

Il catalogo A è formato integrando nella prima parte il catalogo CPTI99 e nella seconda i dati del Bollettino sismico INGV. Il catalogo CPTI99 copre una finestra temporale che dal 217 a.C. arriva fino al 1992. Per l'intervallo 1993-2002 è stato invece utilizzato il bollettino INGV. Il catalogo CPTI99 è corredato anche di appendici che contengono eventi esclusi dal catalogo in quanto non rientravano nei criteri spazio-temporali o energetici definiti per CPTI. L'appendice B di CPTI99 è composta dagli aftershocks, come da definizione NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997), rimossi dal catalogo che per definizione è "declusterato". Per questo lavoro, sono stati inclusi nel catalogo A anche gli eventi che compaiono nell'appendice B, se ricadono dentro la finestra di completezza. In Faenza *et al.* (2003) è stato mostrato come il catalogo sia completo per $M > 5.5$ a partire dal 1600 per la sismicità dell'intera penisola. In totale sono analizzati 147 eventi. La completezza è stata valutata in base allo studio dell'andamento della distribuzione del numero cumulato di eventi secondo la relazione Gutenberg-Richter, come mostrato in Faenza *et al.* (2003) e Faenza (2005).

3.2.2. Catalogo B: CPTI04

Il secondo catalogo utilizzato è CPTI04, la versione aggiornata e rivista di CPTI99. Per quanto riguarda il dominio temporale il catalogo arriva fino al 2002, dunque la finestra temporale 1993-2002 è completamente nuova. Le magnitudo di tutto il catalogo sono state ricalcolate e uniformate a M_w . Per una dettagliata analisi delle scelte e metodologie applicate al catalogo si fa riferimento a Gruppo di Lavoro CPTI04 (2004).

3.3. Le finestre temporali di completezza della magnitudo

Nel catalogo B, seguendo le procedure adottate in CPTI04 (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004), l'intervallo di valori di M_w è stato diviso in 12 classi, ciascuna ampia 0.23 in unità di magnitudo, partendo da una magnitudo minima di $M_w = 4.76$ (inteso come valore centrale della prima classe) fino ad una magnitudo massima di $M_w = 7.39$ (inteso come valore centrale della classe massima). Per ogni classe di M_w e per ogni zona ZS9 sono state definite due stime di intervalli di completezza: una basata su analisi storiche (HC), l'altra su basi statistiche (SC). Nella figura 5 sono riportati come esempio gli intervalli di completezza secondo l'approccio storico e secondo quello statistico per la zona denominata ZS923 in Italia centrale (Abruzzo). Nella figura è messo in evidenza come il periodo di completezza valutato con l'analisi storica sia più lungo di quello stimato con l'analisi statistica.

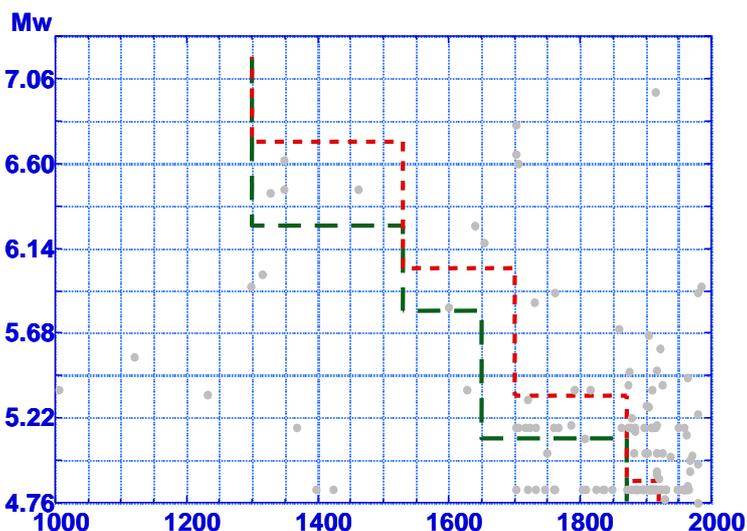


Figure 5. Intervalli di completezza in base all'analisi storica (verde) e all'analisi statistica (rosso) per ZS923. I punti grigi rappresentano i terremoti che ricadono nella zona sorgente (da Gruppo di Lavoro MPS, 2004).

Per questo lavoro sono usati gli eventi con magnitudo minima 5.5, vale a dire a partire dalla quinta classe sopra definita. Gli eventi al di sopra di questa soglia possono essere considerati, nell'ambito della sismicità italiana, "grandi" e indipendenti (Boschi *et al.*, 1995). Per studiare la stabilità dei risultati trovati, l'analisi è effettuata anche per la classe 7 (eventi con magnitudo minima 6.0) e per la classe 9 (eventi con magnitudo minima 6.5). Nella tabella 2 sono visualizzati le date di inizio dei periodi di completezza del catalogo secondo gli approcci storico e statistico per ZS9 relativamente alle tre classi di magnitudo scelte. In parentesi quadra sono riportati il numero di eventi per zona all'interno del periodo completo; questo dato serve per il calcolo dei tassi di occorrenza.

ZS9	$M_w \geq 5.68 \pm 0.115$		$M_w \geq 6.14 \pm 0.115$		$M_w \geq 6.60 \pm 0.115$	
	SC	HC	SC	HC	SC	HC
901	1700 [2]	1530 [2]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
902	1700 [4]	1530 [4]	1530 [1]	1300 [1]	1300 [0]	1300 [0]
903	1700 [0]	1530 [0]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
904	1700 [2]	1530 [2]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
905	1700 [13]	1530 [14]	1530 [3]	1300 [5]	1400 [2]	1100 [3]
906	1700 [2]	1530 [2]	1530 [0]	1300 [0]	1400 [0]	1100 [1]
907	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1400 [0]	1100 [0]
908	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
909	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
910	1700 [4]	1530 [6]	1530 [1]	1300 [1]	1300 [0]	1300 [0]
911	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1300 [0]
912	1700 [3]	1530 [3]	1530 [0]	1300 [0]	1400 [0]	1100 [0]
913	1700 [4]	1530 [4]	1530 [0]	1300 [0]	1400 [0]	1100 [0]
914	1700 [5]	1530 [7]	1530 [0]	1300 [0]	1400 [0]	1100 [0]
915	1700 [5]	1530 [6]	1530 [2]	1300 [2]	1300 [0]	1300 [0]
916	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1200 [0]
917	1700 [7]	1530 [9]	1530 [0]	1530 [0]	1300 [0]	1200 [0]
918	1700 [8]	1650 [8]	1530 [2]	1530 [2]	1300 [0]	1300 [0]
919	1700 [9]	1530 [10]	1530 [2]	1300 [2]	1300 [0]	1200 [0]
920	1700 [0]	1650 [0]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1200 [0]
921	1700 [1]	1530 [2]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1200 [0]
922	1700 [1]	1530 [1]	1530 [0]	1300 [0]	1300 [0]	1200 [0]
923	1700 [11]	1650 [12]	1530 [6]	1530 [6]	1530 [4]	1300 [5]
924	1787 [4]	1787 [4]	1530 [3]	1530 [3]	1530 [1]	1400 [1]
925	1787 [2]	1787 [2]	1530 [3]	1530 [3]	1530 [1]	1400 [1]
926	1787 [1]	1787 [1]	1530 [0]	1530 [0]	1530 [0]	1400 [0]
927	1787 [9]	1787 [9]	1530 [9]	1530 [9]	1530 [6]	1400 [7]
928	1787 [3]	1530 [3]	1530 [0]	1300 [0]	1530 [0]	1300 [0]
929	1787 [13]	1787 [13]	1787 [5]	1530 [11]	1530 [7]	1400 [7]
930	1787 [6]	1787 [6]	1787 [2]	1530 [3]	1530 [1]	1400 [1]
931	1787 [1]	1787 [1]	1787 [0]	1530 [1]	1530 [1]	1530 [1]
932	1700 [2]	1700 [2]	1700 [1]	1530 [1]	1450 [0]	1300 [0]
933	1700 [5]	1700 [5]	1700 [0]	1530 [0]	1450 [0]	1300 [0]
934	1700 [1]	1700 [1]	1530 [1]	1530 [1]	1300 [0]	1300 [0]
935	1700 [3]	1530 [6]	1700 [0]	1530 [2]	1450 [2]	1150 [3]
936	1700 [0]	1530 [0]	1700 [0]	1530 [0]	1450 [0]	1150 [0]

Tabella 2. Anno di inizio del periodo completo per le 3 classi di magnitudo studiate, sia nel caso di analisi storica (HC) che statistica (SC), definito in Gruppo di Lavoro MPS (2004).

4. Prima applicazione: Catalogo A e le 3 zonazioni

In Faenza *et al.* (2003) e in Cinti *et al.* (2004) è stata studiata la sismicità italiana degli ultimi quattrocento anni con magnitudo minima pari a 5.5.

In questo studio, il MHP è stato applicato separatamente a tutte e tre le zonazioni, a parità di tutti gli altri elementi di input, quali il catalogo e i periodi di completezza. Per ogni zonazione, sono state analizzate solo le aree in cui ricade almeno un evento nella finestra di completezza. Per ogni area selezionata, sono stati calcolati i tempi di interevento (IET) e il dato *censoring* (CT; nelle zone con un solo evento è disponibile il solo dato CT). Il vettore delle covariate è un vettore a 2 dimensioni per la griglia regolare (Faenza *et al.*, 2003); a 7 dimensioni per la seconda zonazione (Cinti *et al.*, 2004) e a 5 dimensioni per ZS9.

Il primo risultato è che per tutte e tre le zonazioni l'unico parametro statisticamente significativo è il tasso di occorrenza dell'area, in quanto il vettore $\bar{\beta}$ è diverso da zero, ed è pari a 1.3 ± 0.2 in tutti e tre i casi. Per tutti gli altri parametri, il valore del vettore non differisce sostanzialmente da zero. Questo implica che il tasso di occorrenza è l'unica covariata, fra quelle analizzate, in grado di modificare la statistica dell'occorrenza dei terremoti.

Nella figura 6 è invece riportato il grafico dei residui della funzione di *hazard base-line* $\lambda_0(t)$. I residui hanno un andamento temporale confrontabile con quello di della funzione di *hazard base-line*. Sono definiti come la differenza della trasformazione doppio logaritmica della funzione *survivor* del MHP e la trasformazione doppio logaritmica della funzione *survivor* di una distribuzione di Poisson, dove la funzione *survivor* è la complementare della cumulativa. Tale trasformazione genera una funzione (i residui) il cui andamento temporale è riconducibile alla funzione di *hazard* (Kalbfleisch e Prentice, 1980; Faenza, 2005). La funzione di *hazard* fornisce la probabilità istantanea di occorrenza, condizionata al fatto che non siano avvenuti terremoti nel tempo prima dell'istante in esame.

Rimarchiamo ulteriormente che l'andamento trovato con questa metodologia non è imposto a priori dal modello, ma deriva direttamente dai dati empirici. La figura 6 mostra che, per la finestra di tempo considerata in questo lavoro (402 anni), la funzione di *hazard* ha un andamento decrescente per i primi anni dopo un evento, per poi raggiungere, gradualmente, un andamento costante, circa orizzontale, come in un processo di Poisson; si noti anche che la funzione di *hazard* è pressoché identica per le tre zonazioni. L'andamento evidenziato implica che nei primi anni (fino a circa 10) dopo un terremoto il *clustering* è l'aspetto predominante della distribuzione temporale della sismicità con $M > 5.5$; successivamente, il processo diventa quasi *time-independent*. La spiegazione di questo comportamento esula da questo lavoro, ma si ricordano qui i lavori relativi al *coupling* viscoelastico fra faglie all'interno di una stessa zona (Piersanti *et al.*, 1997; Freed e Lin, 2001) che potrebbero fornire una chiave interpretativa.

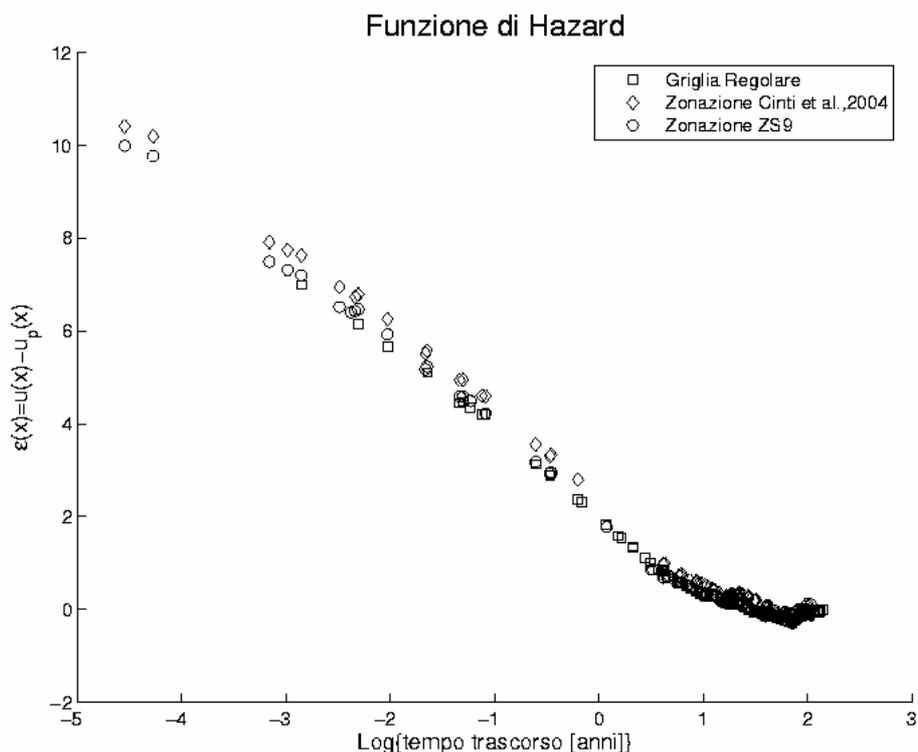


Figura 6. Grafico dei residui del modello in funzione del tempo trascorso dall'ultimo evento (CT). Il trend dei residui è indicativo del trend della funzione di *hazard* (Faenza et al., 2003; Faenza, 2005). I risultati sono relativi al catalogo A, completo per $M > 5.5$ a partire dal 1600.

5. Seconda applicazione: Catalogo B e la zonazione ZS9

Il secondo studio riguarda l'applicazione del MHP al catalogo B usando la zonazione ZS9. Basandoci sulle stime di completezza presentate in Gruppo di Lavoro MPS (2004), per studiare la sismicità degli eventi con magnitudo $M_w > 5.5$ abbiamo usato tutti gli eventi a partire dalla classe 5 di magnitudo (si veda tabella 2). Parallelamente, è stato applicato il MHP, studiando gli eventi avvenuti all'interno delle finestre temporali di completezza storica e statistica. Sono state studiate 33 aree su 36 (vale a dire quelle in cui ricade almeno 1 terremoto), per un totale di 150 eventi (per la completezza storica) e 136 (per quella statistica). Le covariate sono un vettore a 5 dimensioni composto dal logaritmo naturale del tasso di occorrenza dell'area; la magnitudo dell'evento da cui viene calcolata la RV; la profondità ipocentrale, espressa come valore numerico o raggruppata in classi; il meccanismo focale predominante della zona, considerato secondo 4 differenti classificazioni (come proposto da MPS04; come *rake* del momento tensore somma della zona; raggruppato in 3 e 5 classi in base alle recenti analisi dell'Atlas of the Mediterranean seismicity, Vannucci et al., 2004. Si veda tabella 2 e paragrafo 3.1.3 per il dettaglio); infine è stata considerata l'estensione areale della zona. Eccetto che per la magnitudo e l'estensione areale della zona sorgente, tutte le altre covariate sono indicative del comportamento sismico e tettonico dell'area di appartenenza della RV.

Fra tutte le covariate analizzate solo il tasso di occorrenza della zona è significativamente diverso da zero. In questa applicazione del MHP, il tasso di occorrenza è stato normalizzato rispetto all'unità di tempo e di spazio, per mantenere continuità con MPS04, e non solo rispetto all'unità di tempo come in Faenza *et al.* (2003) e Cinti *et al.* (2004). Il vettore-peso β rimane uguale, all'interno dei margini d'errore, a quello trovato applicando il catalogo A alle tre zonazioni, 1.2 ± 0.2 . Dunque, ancora una volta si trova che la densità degli eventi è l'unico parametro, fra quelli considerati, a influenzare la distribuzione spazio-temporale dei terremoti. Come

ulteriore analisi per stabilire il peso statistico di ogni singola covariata, il codice di calcolo è stato applicato considerando solamente una covariata alla volta. In ognuna delle applicazioni, nessuno degli altri parametri è risultato avere un peso statistico diverso da zero.

La funzione di *hazard* per le due stime di completezza è riportata in figura 7. Come trovato per il catalogo A, la funzione di *hazard* ha un andamento decrescente, che rappresenta il *cluster* temporale nell'occorrenza di terremoti. Nonostante la funzione di *hazard* abbia la stessa struttura applicando i due cataloghi, la durata temporale del *cluster* (la fine del *cluster* può essere in prima analisi identificata in figura come la fine dell'andamento decrescente e l'inizio di quello costante) e la sua intensità sembrano essere diversi. In particolare, il *cluster* del catalogo B dura meno tempo (pochi anni) ed è anche meno intenso. Non ci sono invece differenze sostanziali fra la completezza storica e statistica.

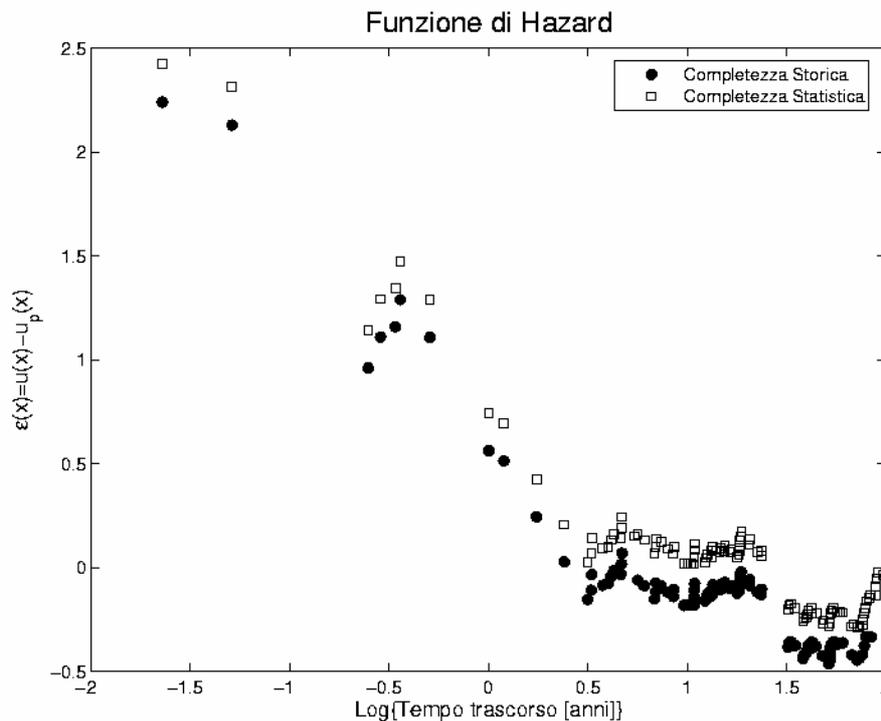


Figura 7. Grafico dei residui del modello in funzione del tempo trascorso dell'ultimo evento (CT). Il trend dei residui è indicativo del trend della funzione di *hazard* (Faenza et al., 2003; Faenza, 2005). I risultati sono relativi al catalogo B con applicazione degli intervalli di completezza storica e statistica e sismicità a partire dalla classe 5 ($M_w > 5.5$).

6. Terza applicazione: la zonazione ZS9 con diverse soglie di magnitudo

Come ultima analisi dello studio della funzione di *hazard* per la sismicità italiana, il MHP è stato applicato a ZS9, usando altre due soglie di magnitudo, cui corrispondono in MPS04 diverse finestre temporali di completezza: il primo gruppo considera gli eventi che hanno magnitudo minima pari a 6.0 (corrispondente al valore centrale della classe 7 tra le 12 in cui è stato suddiviso l'intero intervallo di magnitudo del catalogo), mentre il secondo gruppo comprende gli eventi con magnitudo minima pari a 6.5 (corrispondente al valore centrale della classe 9). L'innalzamento della soglia di magnitudo porta ad una diminuzione dei dati disponibili per l'analisi: considerando la prima soglia ($M \geq 6.0$) gli eventi che rientrano nel periodo considerato completo sono 53 secondo l'approccio storico e 41 secondo quello statistico; con la seconda soglia, gli eventi sono rispettivamente 30 e 25. Anche il numero delle aree per le quali è stato possibile condurre l'analisi si è ridotto: nel primo caso, 16 aree su 36 sono state analizzate adottando la completezza storica e 14 con quella statistica, mentre nel

secondo caso sono rispettivamente 10 e 9.

L'applicazione del MHP mostra come prima che l'unica covariata con peso statistico diverso da zero è il tasso di occorrenza dell'area. In figura 8 sono stati riportati i risultati della funzione di *hazard*, espressa attraverso lo studio dei residui, per le tre diverse soglie di magnitudo. La figura mostra i risultati solo per la completezza storica, in quanto quelli per la completezza statistica non differiscono in maniera apprezzabile. Nel grafico sono riportati anche i risultati dello studio fatto usando il catalogo A con $M > 5.5$. Nella figura si nota come, aumentando la soglia di magnitudo, l'intensità e la durata del *cluster* aumentano. Inoltre, è anche molto chiara e marcata la differenza fra l'intensità del *cluster* del catalogo A e del catalogo B a parità di soglia di magnitudo.

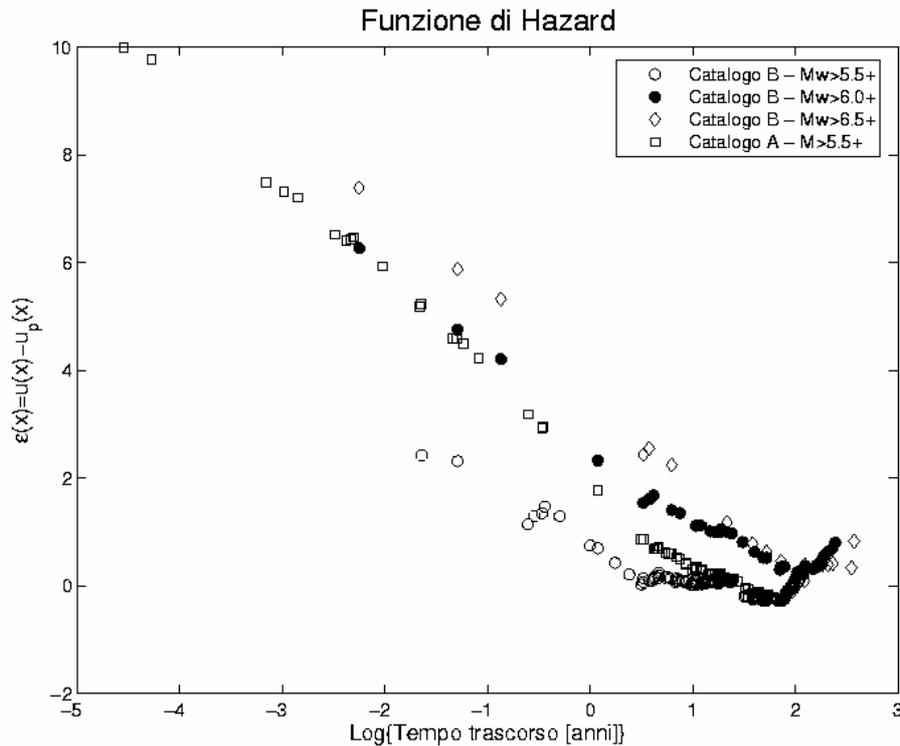


Figura 8. Grafico dei residui del modello in funzione del tempo trascorso dell'ultimo evento (CT). Il trend dei residui è indicativo del trend della funzione di *hazard* (Faenza et al., 2003; Faenza, 2005). In figura sono riportati, per la sola completezza storica, i risultati per ZS9 usando il catalogo B con tre diverse soglie di magnitudo ($M > 5.5$; $M > 6.0$ e $M > 6.5$) e usando il catalogo A con $M > 5.5$.

7. Mappe di probabilità di occorrenza

La conoscenza della funzione di *hazard* permette la definizione univoca della distribuzione del processo puntuale. Dunque attraverso la funzione di *survivor* (la funzione complementare alla cumulativa) è possibile stimare la probabilità condizionata di occorrenza di almeno un evento nei prossimi τ anni per ogni specifica zona sapendo che non sono avvenuti terremoti nei precedenti t anni:

$$P = \frac{S(t, \bar{z}) - S(t + \tau, \bar{z})}{S(t, \bar{z})}$$

Equazione 2

dove t è il dato CT e $S(t, \bar{z})$ è la funzione di *survivor* stimata dai dati empirici, i.e., la probabilità che il prossimo evento occorrerà in un tempo non maggiore di $t + \tau$ per un vettore di covariate \bar{z} (per i dettagli si vedano Faenza et al., 2003, e Faenza, 2005).

In questo modo è possibile costruire una mappa di probabilità di evento con $M > 5.5$ per $\tau = 10$ anni, dove il valore di 10 anni è una finestra temporale per la quale la stima è ritenuta attendibile considerando la lunghezza del catalogo usato.

In figura 9 sono mostrate le 33 zone su 36 che hanno avuto almeno un evento all'interno della finestra temporale di completezza definita con l'approccio storico e statistico rispettivamente, per gli eventi con $M > 5.5$. Nella mappa solo la variabile tasso di occorrenza è stata usata come covariata, in quanto è l'unica statisticamente significativa. Le mappe per le due stime di completezza sono molto simili e mostrano che le aree con la maggiore probabilità di occorrenza sono l'Appennino meridionale, parte dell'Appennino centrale e il Friuli. Per le zone in cui non sono avvenuti eventi al di sopra della soglia di magnitudo stabilita e per le aree esterne alla zonazione, la probabilità è stata arbitrariamente considerata come minore di 0.01.

Le mappe con probabilità di occorrenza per eventi con $M > 6.0$ e $M > 6.5$ mostrano che l'Appennino meridionale ha probabilità relativamente alta, mentre non si osservano più le probabilità elevate in Appennino centrale e nel nord Italia. Questo riflette la diversa distribuzione dei terremoti rispetto alla magnitudo fra l'Appennino meridionale e quello centrale.

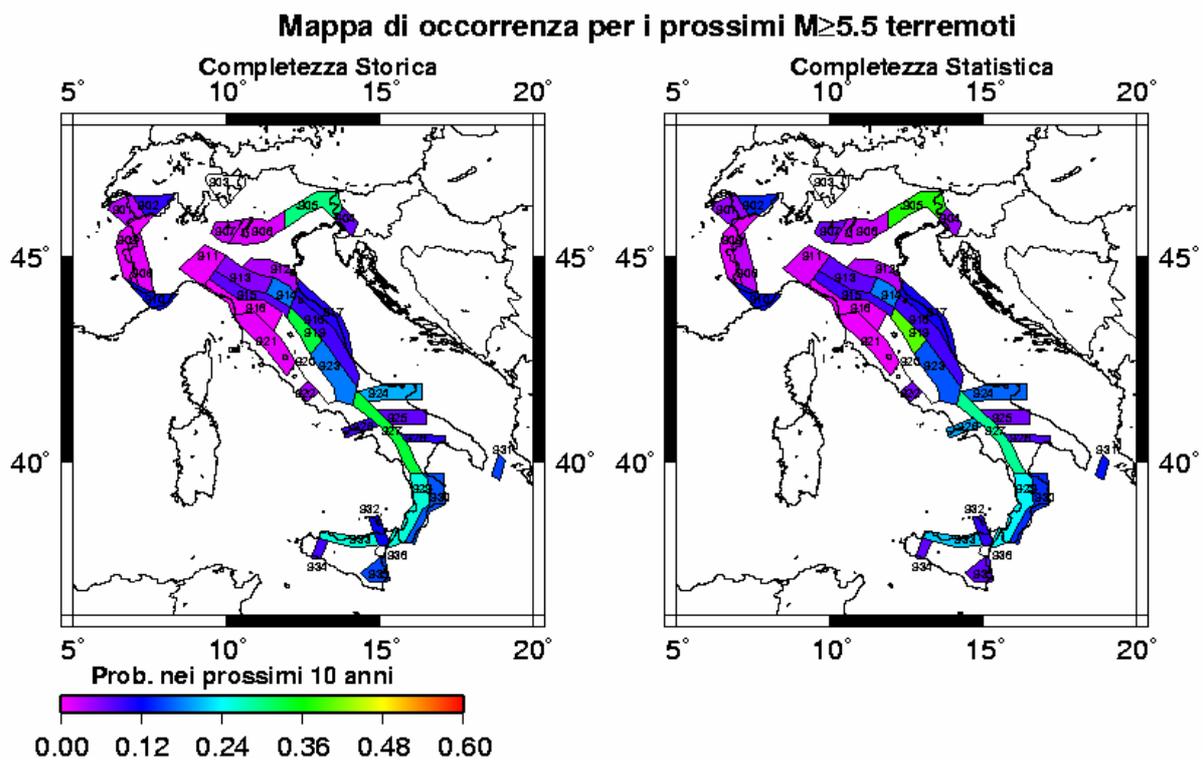


Figura 9. Mappa di probabilità di occorrenza per i prossimi 10 anni di terremoti con $M > 5.5$ per la completezza storica e statistica.

Mappa di occorrenza per i prossimi $M \geq 6.0$ terremoti

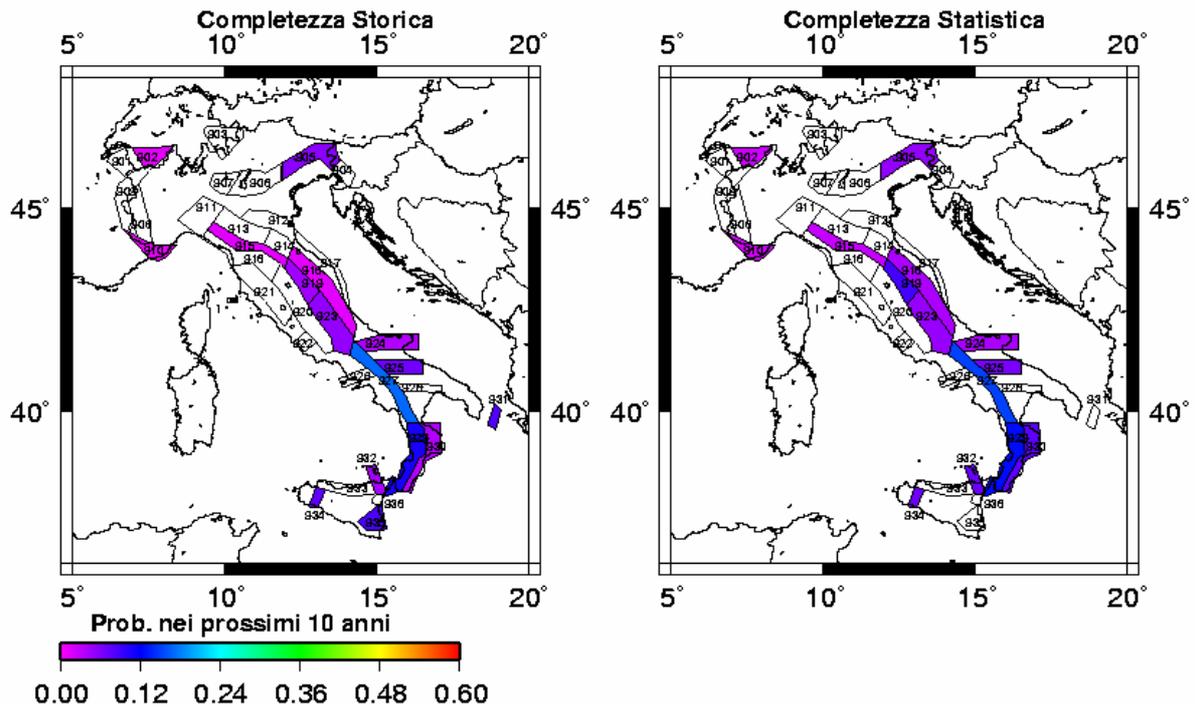


Figura 10. Mappa di probabilità di occorrenza per i prossimi 10 anni di terremoti con $M > 6.0$ per la completezza storia e statistica.

Mappa di occorrenza per i prossimi $M \geq 6.5$ terremoti

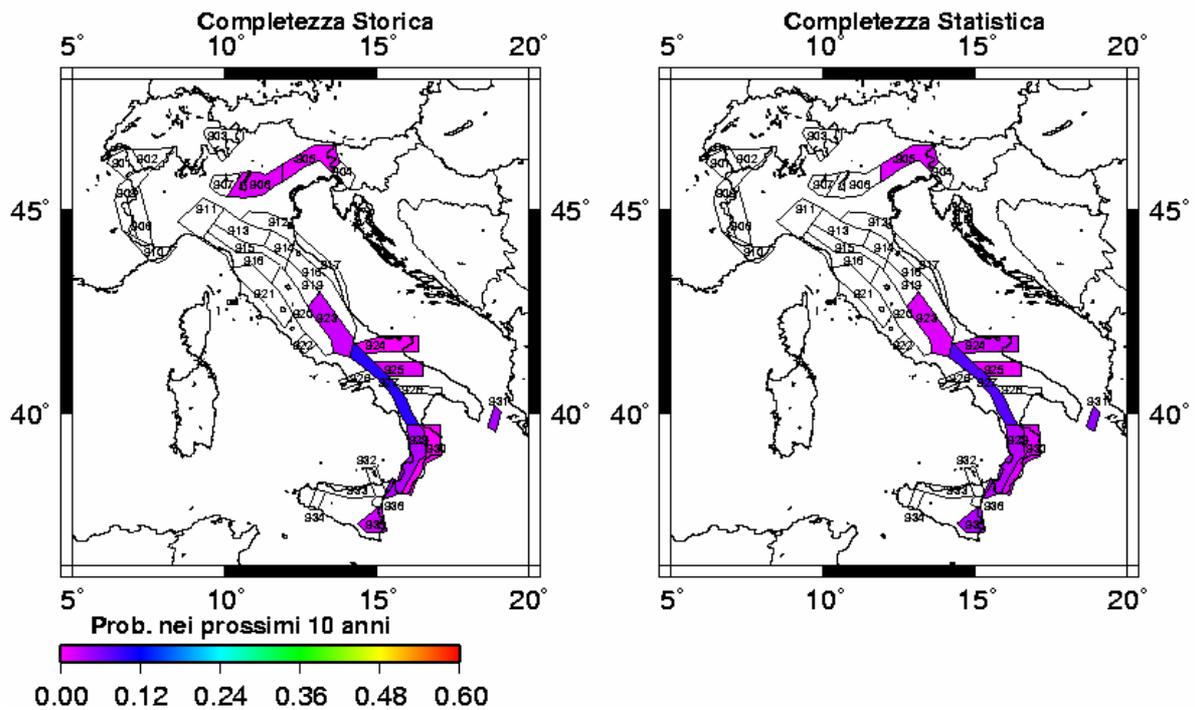


Figura 11. Mappa di probabilità di occorrenza per i prossimi 10 anni di terremoti con $M > 6.5$ per la completezza storia e statistica.

8. Analisi della capacità predittiva di MHP

8.1. Analisi del Goodness-of-fit

Un passaggio fondamentale per ogni modello è la sua validazione, per vedere se le assunzioni fatte sono in accordo con i dati reali. Tale validazione, indipendentemente dal tipo di modello, deve essere fatta su un gruppo di dati indipendenti, ovvero su dati che non sono stati considerati in alcun passo durante la costruzione del modello. Nello studio delle sequenze temporali i dati indipendenti sono sicuramente forniti dagli eventi futuri. In ogni caso, senza aspettare gli eventi futuri, è possibile fare un test su dati indipendenti, dividendo i dati a disposizione in due parti: una per l'apprendimento e l'altra per la validazione. Questo approccio fornisce una condizione necessaria per la validità del modello. Ovvero, è possibile rigettare il modello se non stima bene i dati della fase di validazione, poiché, ad esempio, non è in grado di spiegare tutte le caratteristiche dei dati reali. Al contrario, se i dati di validazione sono stimati bene non è comunque possibile in ogni caso escludere la possibilità di un *over-fitting* dei dati. Questa possibilità può essere drasticamente ridotta usando un modello con un numero di parametri molto minore delle osservazioni indipendenti. In ogni caso, come già rilevato, la reale capacità di un modello di descrivere i dati reali può essere stimata solo con l'analisi di dati indipendenti.

Nel dettaglio del MHP, il *goodness-of-fit* può essere stimato empiricamente normalizzando i dati indipendenti della fase di validazione. La normalizzazione scelta porta alla definizione dei residui. La normalizzazione fatta è una specie di standardizzazione statistica e trasforma un processo puntuale casuale e non-negativo in un processo di Poisson con tasso 1. Il dettaglio di questa tecnica può essere trovato in Ogata (1988), Faenza *et al.* (2003) e Faenza (2005). Se il modello risulta appropriato, i residui dovrebbero disporsi come una distribuzione esponenziale con media 1. Dunque, il confronto, con un test di Kolmogorov-Smirnov (e.g. Gibbons, 1971), della cumulativa empirica dei residui con quella teorica della curva esponenziale fornisce il *goodness-of-fit* del modello.

8.1.1. Completezza Storica

In figura 12 è riportato il grafico del *goodness-of-fit* per i dati di apprendimento e di validazione, per eventi con $M > 5.5$ nel caso di adozione di completezza stimata con l'approccio storico. I dati della fase di validazione sono gli eventi avvenuti dopo il 1951; pertanto si hanno 127 eventi per la fase di apprendimento (dall'inizio della completezza al 1951) e 23 per quella di validazione (eventi dal 1952 al 2002). Dalla figura è possibile dedurre che il modello spiega bene i dati, sia per la fase di apprendimento che per quella di validazione. Il *goodness-of-fit* è stimato quantitativamente con il test di Kolmogorov-Smirnov a un campione (Gibbons, 1971). Il livello di significatività per il quale l'ipotesi nulla di uguale distribuzione può essere rigettata è riportato in figura; in entrambi i casi è > 0.10 .

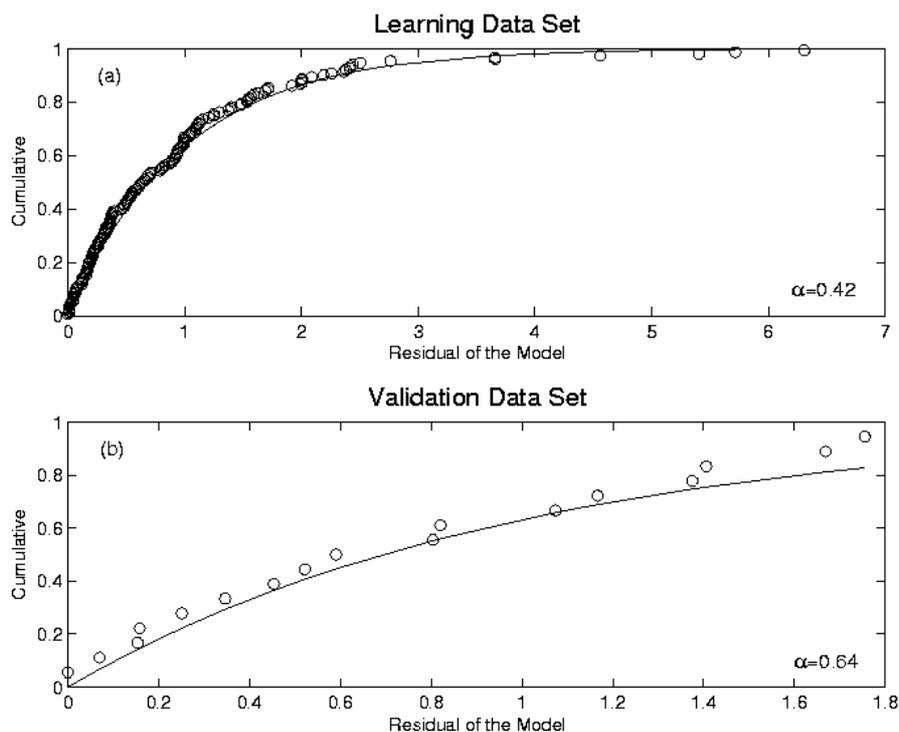


Figura 12. a) Funzione cumulativa empirica (cerchi) e teorica (linea continua) dei residui ottenuti per i dati di apprendimento. Il parametro α è il livello di significatività a cui si può rigettare l'ipotesi nulla. b) Come per a), ma relativamente ai dati di validazione.

8.1.2. Completezza Statistica

La stessa procedura è stata applicata ai dati che ricadono all'interno della finestra di completezza statistica con $M > 5.5$. La fase di apprendimento è composta di 113 eventi avvenuti prima del 1951; quella di validazione considera gli eventi nella finestra di tempo 1952-2002 per un totale di 23 terremoti. La figura 13 mostra il *goodness-of-fit* dei residui con il modello teorico. Anche in questo caso il test di Kolmogorov-Smirnov ad un campione mostra che il modello spiega bene i dati.

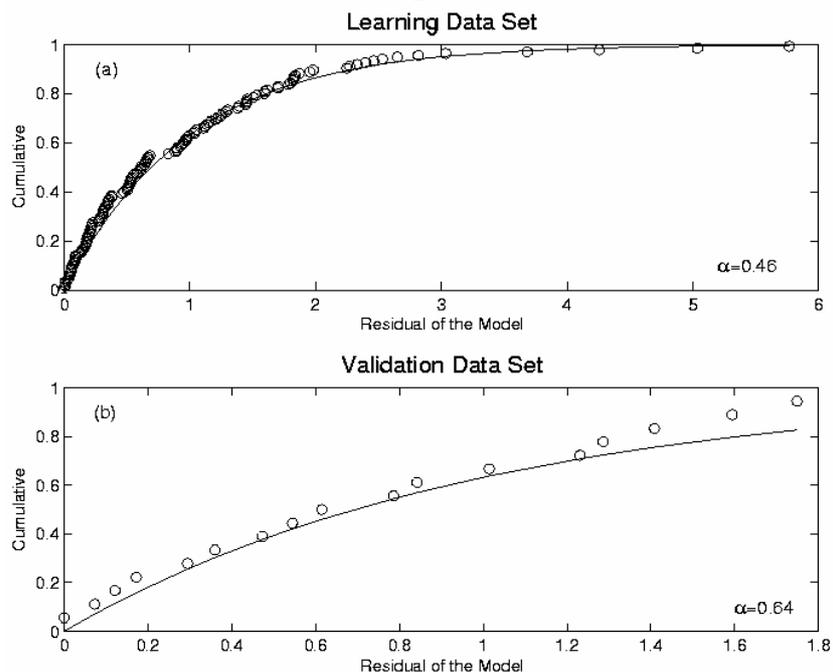


Figura 13: Come in figura 12 ma per la completezza statistica.

8.2. Test retrospettivo su dati indipendenti

Come ultima applicazione per valutare la capacità predittiva del MHP è stato eseguito un test retrospettivo. A tale scopo, sono state calcolate la probabilità di occorrenza in quelle aree in cui si sono verificati terremoti con magnitudo $M > 5.5$ a partire dal 1951. Il test può essere considerato retrospettivo poiché per ogni evento nella finestra 1952-2002 il modello è stato calibrato considerando solo gli eventi avvenuti prima dell'evento in esame. La probabilità è stata poi raggruppata in quattro classi: "ALTA", "MEDIA", "BASSA" e "TRASCURABILE". Le categorie sono assegnate mettendo in ordine le probabilità: la posizione i implica che ci sono $i-1$ aree con probabilità maggiore. Dunque, la categoria "ALTA" definisce le zone che hanno probabilità maggiore della probabilità del 66° percentile; la categoria "MEDIA" è per le zone con probabilità compresa fra la probabilità del 33° percentile e quella del 66° percentile; la categoria "BASSA" invece racchiude le zone con probabilità minore della probabilità del 33° percentile e infine le zone classificate con probabilità "TRASCURABILE" che corrispondono a quelle per le quali non sono noti terremoti storici in catalogo.

Come sottolineato precedentemente, il dominio spaziale è l'aspetto più debole del modello. Infatti, la definizione geometrica delle zone e l'applicazione dei dati di intertempo come variabili random porta alla definizione di *box* con probabilità spazialmente omogenea, senza alcun passaggio sfumato di probabilità fra una zona e l'altra. Alla luce di questo, la probabilità degli eventi che avvengono ai bordi fra due zone, o fra la zonazione e l'area del cosiddetto *background*, è soggetta a forti *bias*. In questo lavoro si è cercato di migliorare la definizione del dominio spaziale, anche se rimane tuttora un problema aperto ed importante, che necessita di ulteriori studi nel futuro.

Per rendere il test retrospettivo più realistico, l'assegnazione degli eventi della fase di validazione alle zone di ZS9 è stata fatta considerando la dimensione della superficie di rottura. A questo scopo è stata utilizzata la relazione di Wells e Coppersmith (1994), che fornisce la lunghezza della faglia in funzione della magnitudo momento.

$$\log L = -2.44(\pm 0.11) + 0.59(\pm 0.02)M_w$$

Equazione 3: Relazione fra la magnitudo momento e la lunghezza della faglia (Wells e Coppersmith, 1994)

Come dimensione spaziale dell'evento è stato considerato un cerchio di raggio $L/2$ dall'epicentro. Dunque, l'evento apparterrà alla zona o alle zone in cui tale cerchio ricade anche solo parzialmente.

L'altra importante assunzione che sta alla base del modello di zone sorgente e al loro utilizzo nei modelli probabilistici convenzionali è che la funzione di *hazard* decade bruscamente al loro limite, sebbene questi non rappresentino alcun limite fisico reale. Il passaggio fra la fine della zonazione e il resto del territorio e fra i bordi di due zone dovrebbe essere graduale per rappresentare in maniera più realistica la distribuzione spaziale degli eventi. Un espediente per ridurre questo problema è stato quello di utilizzare i cosiddetti "bordi morbidi" (tabella 1 e figura 14). La definizione dei bordi morbidi è stata fatta in sede di definizione del modello ZS9 allo scopo di considerare gli errori relativi alla definizione delle zone e di rendere il passaggio fra le zone più progressivo (per i dettagli della loro definizione si veda Gruppo di Lavoro MPS, 2004)

È importante rimarcare che questi ultimi due accorgimenti sono stati usati solamente per assegnare l'appartenenza degli eventi alla zonazione per il test retrospettivo. Nel caso in cui l'evento appartenga a due zone, la sua probabilità di occorrenza è calcolata come la media dei valori di probabilità delle zone di appartenenza, mediata sulla distanza fra l'evento e il bordo delle zone.

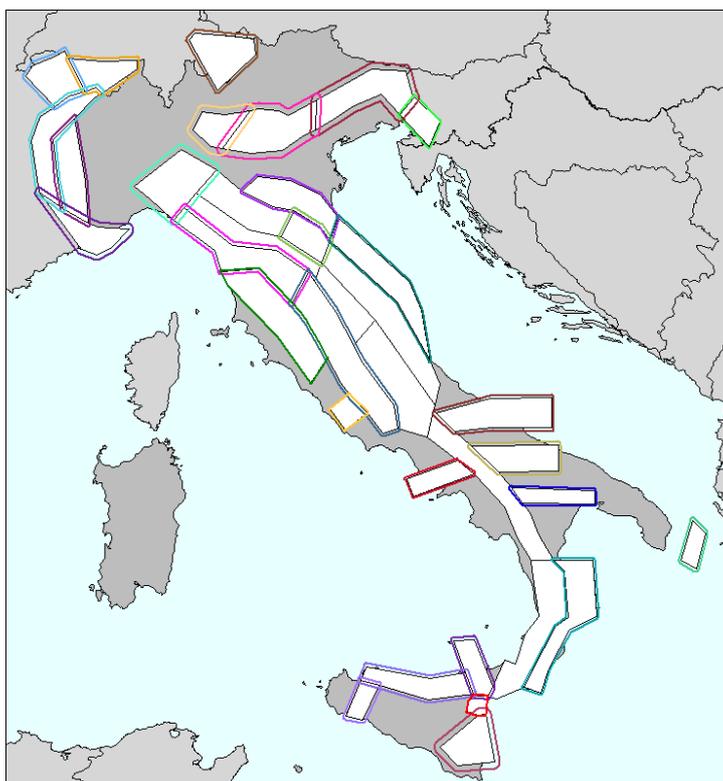


Figura 14: Bordi Morbidi per ZS9

La tabella 3 riassume i risultati per il test retrospettivo applicato ai 23 eventi avvenuti dal 1952 al 2002 con $M > 5.5$, usando la zonazione ZS9. In tabella sono riportati i risultati ottenuti usando il catalogo A e il catalogo B, e in parentesi quadra i risultati del testo retrospettivo applicato ad un modello *time-independent*, ovvero dove gli eventi si distribuiscono come una distribuzione di Poisson.

# eventi	3 Aree con P maggiore	Aree con Prob. ALTA	Aree con Prob. MEDIA	Aree con Prob. BASSA	Aree con Prob. TRASCURABILE
Catalogo A $M > 5.5$ dal 1600	11 [7]	13 [13]	3 [3]	0 [0]	7 [7]
Catalogo B classe 5 HC	3 [3]	11 [13]	4 [3]	2 [1]	6 [6]

Tabella 3: Test retrospettivo per il MHP effettuato sui dati della fase di validazione. In parentesi quadre sono riportati i risultati per il modello di Poisson.

Per meglio spiegare come è avvenuto il test, si può dire che per ognuno dei 23 eventi con $M > 5.5$ che sono realmente occorsi tra il 1951 e il 2002 si è fatta la stima ipotizzando di essere immediatamente dopo l'evento precedente e si è valutata la posizione della zona sorgente dell'evento in una graduatoria per probabilità di occorrenza decrescente.

Dalla tabella risulta che 3 eventi su 23 avvengono nelle 3 aree con probabilità maggiore usando il catalogo B mentre 11 su 23 nelle prime 3 aree se si usa il catalogo A. Inoltre, 11 su 23 eventi sono avvenuti in aree classificate come probabilità ALTA

per il catalogo B e 13 su 23 per il catalogo A. Gli eventi che ricadono nella classe TRASCURABILE sono gli eventi ai quali non siamo in grado di assegnare la probabilità. Possiamo dunque dire che approssimativamente il prossimo evento avverrà con l'80% di probabilità all'interno delle 33 aree in cui è possibile calcolare la probabilità, sia per il catalogo A che per il catalogo B, e per il 70% nelle zone in cui è stata valutata probabilità di occorrenza non trascurabile.

Un aspetto importante da rimarcare è che usando il catalogo B, i risultati del MHP non sono molto diversi da quello del modello di Poisson. La spiegazione è da ritrovare nelle diverse funzioni di *hazard* ottenute per i cataloghi A e B (figure 6, 7 e 8). Come già rimarcato, dopo un comportamento iniziale a *cluster* (andamento decrescente) la funzione si comporta come in un processo di Poisson, dove la probabilità di avere un terremoto non dipende più dal tempo trascorso dall'ultimo evento. In termini di probabilità di evento, questo implica che se il tempo dall'ultimo terremoto è lungo (il dato CT), la probabilità data dal MHP e da Poisson è simile; l'unico parametro, fra quelli analizzati, che condiziona l'occorrenza dei terremoti è il tasso dell'area, dunque le aree più probabili saranno quelle con il *rate* più alto. La capacità predittiva del MHP è maggiore rispetto al modello di Poisson solo per CT piccoli, quando gli eventi avvengono ravvicinati nel tempo, quando cioè nel grafico della funzione di *hazard* ci troviamo nell'andamento a *cluster*. Ma le due funzioni per i due cataloghi differiscono nel *cluster* sia per intensità che per durata. Nel dettaglio, il *cluster* del catalogo A è molto più lungo e intenso del *cluster* del catalogo B.

Per meglio sottolineare l'importanza degli algoritmi di *de-clustering* nelle stime di probabilità di evento, sono stati analizzati tre casi specifici, descritti di seguito.

Il primo studio riguarda il terremoto del Friuli del 1976. In figura 15 sono riportati i risultati usando il catalogo A. Nei pannelli in alto sono riportati i valori di probabilità per la zona ZS905 prima dell'occorrenza del primo evento della sequenza del Friuli, il 06/05/1976. ZS905 è una zona sismicamente attiva con un alto tasso di eventi. Il dato CT della zona è di 40 anni, dunque fuori dalla finestra temporale del *cluster*. Le probabilità date dal MHP e dal modello di Poisson non differiscono sensibilmente. Nei pannelli in basso, invece, è riportata la probabilità di ZS905 prima dell'occorrenza dell'ultimo grosso evento della sequenza friulana, il 15/09/1976. Il dato CT in quel caso è molto breve e dunque la probabilità del MHP è molto più alta di quella di Poisson.

In figura 16 è invece riportato lo stesso terremoto ma utilizzando il catalogo B. Nel pannello superiore la situazione non è diversa da quella di figura 15. Il dato CT è lungo e le probabilità valutate dal MHP e da Poisson non sono molto differenti. Nel pannello inferiore, invece, è riportata la probabilità prima dell'occorrenza dell'ultimo evento il 15/09/1976. In questo caso, il dato CT è di quattro mesi, poiché il catalogo B è *de-clustered*, e le probabilità stimate dal MHP e da Poisson non sono molto diverse.

Nel secondo esempio riportiamo i risultati per l'analisi della sequenza Umbro-Marchigiana del 1997 usando il catalogo A. La figura 17 mostra le probabilità di occorrenza del primo evento del 26/09/1997 nei pannelli superiori: i valori di probabilità non differiscono molto fra l'analisi del MHP e del modello di Poisson; il dato CT è lungo (80 anni) e la zona ha una probabilità alta poiché ha un alto tasso di sismicità. La probabilità dell'ultimo grande evento della sequenza, il 19/10/1997 ha un CT di alcuni mesi e quindi la probabilità data dal MHP è molto più alta di quella fornita dal modello di Poisson (fig. 17, pannelli inferiori).

Come ultimo esempio, la sequenza di eventi del Molise del 2002. Il primo evento ha un dato CT molto lungo, 127 anni. La zona ha una sismicità media e la probabilità del MHP e di Poisson non sono basse, come mostrato in figura 18 nei pannelli superiori. Il secondo evento con $M > 5.5$ avviene poche ore dopo il primo; la probabilità stimata del MHP è molto più alta di quella fornita dal modello di Poisson. È importante rimarcare che questi ultimi due esempi non sono stati ripetuti con il catalogo B, poiché per ognuno di questi casi il catalogo fornisce un solo evento con $M > 5.5$.

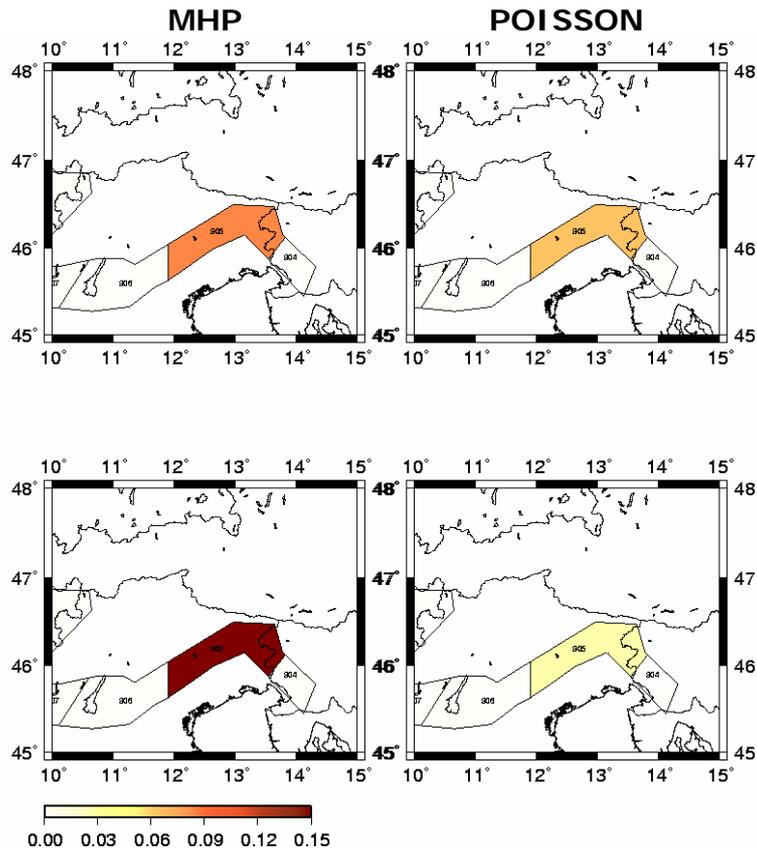


Figura 15. Confronto fra la probabilità di occorrenza del MHP e del modello di Poisson usando il catalogo A, per il primo e l'ultimo evento della sequenza del Friuli, 1976.

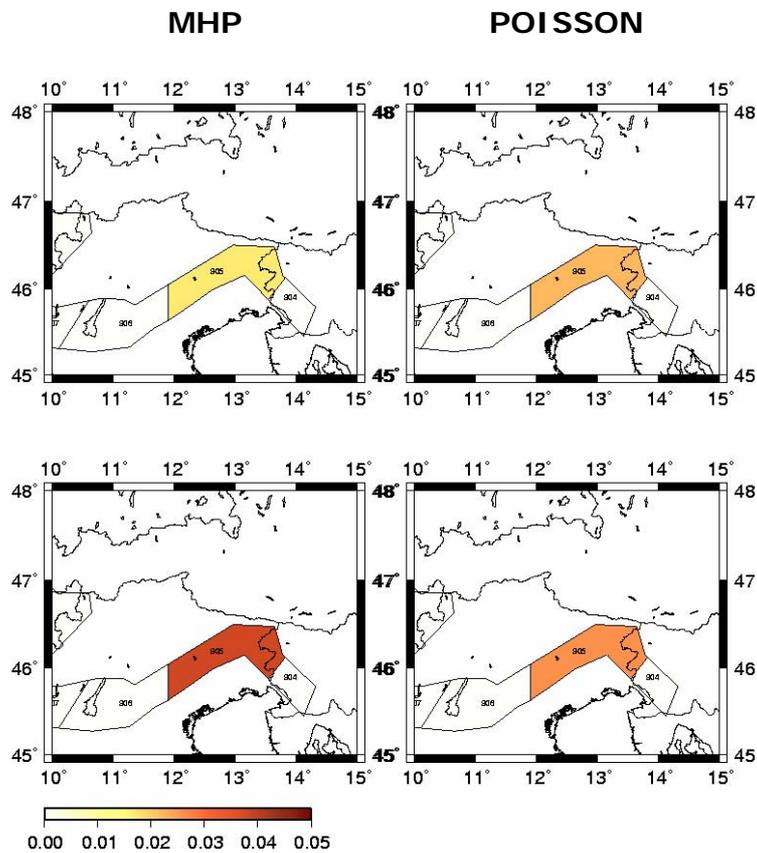


Figura 16. Confronto fra la probabilità di occorrenza del MHP e del modello di Poisson usando il catalogo B, per il primo e l'ultimo evento della sequenza del Friuli, 1976.

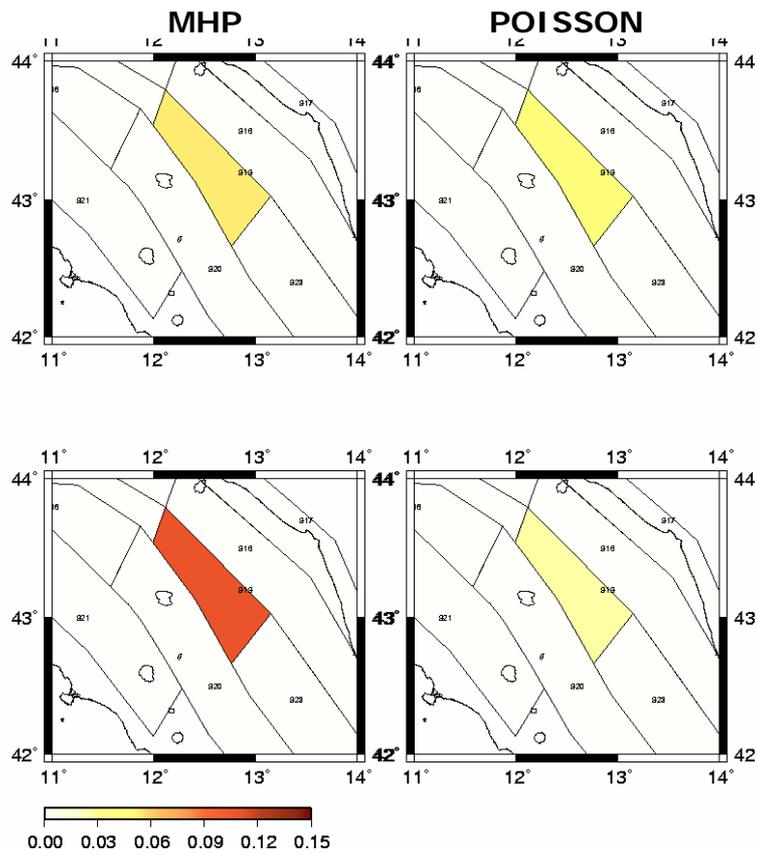


Figura 17. Confronto fra la probabilità di occorrenza del MHP e del modello di Poisson usando il catalogo A, per il primo e l'ultimo evento della sequenza Umbro-Marchigiana del 1997.

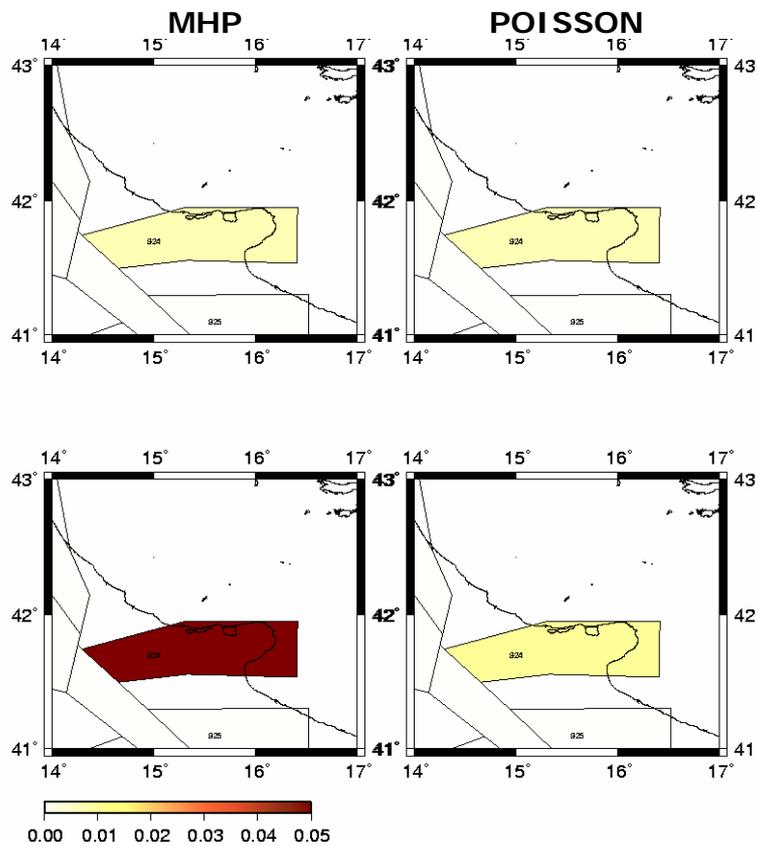


Figura 18. Confronto fra la probabilità di occorrenza del MHP e del modello di Poisson usando il catalogo A, per il primo e l'ultimo evento della sequenza del Molise del 2002.

9. Commenti finali

Nello studio della definizione delle aree prioritarie sulle quali intervenire per la riduzione del rischio sono state implementate diverse metodologie per analizzare la distribuzione spazio-temporale dei terremoti. Una di queste tecniche si basa sullo studio della funzione di *hazard* per la distribuzione nel tempo degli eventi maggiori, con $M > 5.5$, messo a punto all'interno del modello di *hazard* proporzionale (MHP), sviluppato da Faenza *et al.* (2003) e Faenza (2005).

L'analisi della distribuzione dei grandi terremoti è costituita da diversi elementi. Infatti, oltre alla distribuzione temporale statistica degli eventi, hanno un ruolo rilevante anche gli elementi utilizzati nella stima, quali il catalogo dei terremoti, la zonazione sismogenetica e i diversi intervalli di completezza del catalogo. In questo lavoro, gli stessi elementi di *input* di MPS04 sono stati introdotti nel MHP, con lo scopo di studiare la sua stabilità e dipendenza da fattori come la zonazione, il catalogo e l'inizio del periodo completo per catalogo per le diverse magnitudo.

Lo stesso modello non-parametrico per l'occorrenza dei terremoti è stato applicato a tre diverse zonazioni, a due cataloghi sismici, a tre soglie di magnitudo, usando diversi parametri geologico/tettonici per la caratterizzazione delle singole zone.

Il primo importante risultato è la presenza del *cluster* temporale degli eventi in tutte le stime compiute in questo studio. Inoltre, sembra che il *cluster* non dipenda dalla magnitudo, in contraddizione con quanto trovato nei modelli *time-predictable*. Di tutti i parametri analizzati, solo il tasso di occorrenza della zona è statisticamente significativo, ovvero è l'unico parametro in grado di modificare la probabilità di occorrenza.

Un interessante risultato emerso è che le caratteristiche del *cluster*, in termini di durata temporale e di intensità, sono fortemente vincolate al catalogo usato, e in particolare, all'algoritmo di *de-clustering* applicato. Questo aspetto si riflette nelle stime di probabilità di evento ed è particolarmente evidente nel test retrospettivo. In base alla struttura trovata per la funzione di *hazard*, gli algoritmi di *de-clustering* rimuovono dal catalogo gli eventi su cui il MHP ha una capacità predittiva maggiore del modello Poissonian. L'uso di differenti zonazioni non influenza invece i risultati.

Infine, i risultati ottenuti sono trasformati in mappa di probabilità condizionata per l'occorrenza di forti terremoti nei prossimi 10 anni. I risultati evidenziano come le aree con probabilità maggiore sono il Friuli, l'Arco Calabro e l'Umbria-Marche. L'aumento della magnitudo di soglia, $M > 5.5$, $M > 6.0$ e $M > 6.5$, comporta la perdita di definizione delle stime nell'Appennino centrale e nel Nord della penisola.

Bibliografia

- Boschi E., Gasperini P. and Mulargia F. (1995). Forecasting where larger crustal earthquakes are likely to occur in the near future, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1475-1482.
- Camassi R. e Stucchi M. (1997). NT 4.1.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia di danno. Rapporto tecnico GNDT, Milano, 66 pp. + <http://emidius.mi.ingv.it/NT/home.html>.
- Cinti F.R., L. Faenza, W. Marzocchi, and P. Montone (2004). Probability map of the next $M \geq 5.5$ earthquakes in Italy, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q11003, doi:10.1029/2004GC000724.
- Cox D.R. (1972). Regression models and life tables (with discussion), *J. R. Stat. Soc. B*, 34, 187-220.
- Faenza L. (2005). Analysis of the spatio-temporal distribution of large earthquakes, Ph. D. Thesis, Università degli Studi di Bologna, Alma Mater Studiorum, Bologna, Italy.
- Faenza L., W. Marzocchi, and E. Boschi (2003). A non-parametric hazard model to characterize the spatio-temporal occurrence of large earthquakes; an application to the Italian catalogue, *Geophys. J. Int.*, 155(2), 521-531.

- Faenza, L., Marzocchi, W., Lombardi, A.M., Console, R. (2004). Some insights into the time clustering of large earthquakes in Italy. *Ann. Geophys.* 47, 1635-1640.
- Freed A. M. and Lin J. (2001). Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer, *Nature*, 411, 180-183.
- Frohlich C. (2001). Display and quantitative assessment of distribution of earthquake focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, 177, 300-308.
- Gibbons J. D. (1971). *Non-parametric statistical Inference*, 306pp., McGraw-Hill, New York.
- Gruppo di Lavoro CPTI (1999). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*. ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna, 92 pp.
- Gruppo di Lavoro CPTI (2004). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*. INGV, Milano-Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>.
- Gruppo di Lavoro MPS (2004). *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile*, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65pp. + 5 appendici.
- INGV-CNT *Bollettino Sismico*. Disponibile all'indirizzo <http://ftp.ingv.it/bollet>
- Kalbfleisch J.D. (1985). *Probability and Statistical Inference*, 2nd edn, Springer-Verlag, New York.
- Kalbfleisch J.D. and Prentice R.L. (1980). *The statistical analysis of failure time data*, John Wiley and Sons, New York.
- Kostrov B.V. (1974). Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock, *Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth*, 135, 23-40.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G., Boschi E. (2007). The ZS9 seismic source model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics (submitted)*.
- Ogata Y (1988). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Stat. Ass.*, 83, 9-27.
- Piersanti A., Spada G. and Sabadini R. (1997). Global post-seismic rebound of a viscoelastic Earth: Theory for finite faults and application to the 1964 Alaska earthquake, *J. Geophys. Res.*, 102,477-492.
- Serpelloni E., G. Vannucci, S. Pondrelli, G. Casula, M. Anzidei, A. Galvani, A. Argnani, P. Baldi, P. Gasperini (2005). The complex Nubia-Eurasia plate boundary in the Mediterranean: new kinematics and tectonics constraints from GPS and focal mechanism data, *Geophys. Res. Abstr.*, G11-GD12, Eur. Geophys. Un. A-03790.
- Valensise, G., Pantosti, D. (2001). The Data Base of Potential Source for Earthquakes Larger than $M \geq 5.5$: data base description, software structure and run-time manual. *Ann. Geofis.*, 44(4), pp. 964.
- Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Morelli, A., Gasperini, P., Boschi, E. (2004). An Atlas of Mediterranean seismicity. *Ann. Geophys.*, 47(1), Suppl. 1, 247-306.
- Wells D.L. and K.J. Coppersmith (1994). New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Working Group on California Earthquake Probabilities (2003). *Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region* (U.S. Geologic Survey, Denver), USGS Open File Report 03-214.