



POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Dipartimento di Matematica

Elsa Garavaglia [§]

Elisa Guagenti [§]

Raffaella Pavani ^{*}

Lorenza Petrini [§]

^(§) *Dipartimento di Ingegneria Strutturale*

^(*) *Dipartimento di Matematica*

Politecnico di Milano

La predicibilità di un terremoto caratteristico nell'ipotesi dei processi di rinnovo del tipo mistura

1 POSIZIONE DEL PROBLEMA E METODOLOGIA

Il lavoro svolto nell'ambito dei Progetti INGV-DPC 2004-2006, in particolare nell'ambito del Progetto S2 -Terremoti probabili in Italia nel trentennio 2005 – 2035 Task 4_Caratterizzazione del comportamento delle sorgenti sismogenetiche e assegnazione di probabilità di attivazione, l'unità di ricerca UR4 _Polimi ha affrontato il problema della previsione dei terremoti, o meglio di un grado minimo di previsione che chiamiamo background prediction, leggibile nella sequenza dei terremoti indipendentemente dall'osservazione di segnali precursori.

E' stato trattato il caso di un terremoto che diremo "caratteristico perturbato" nel senso che, accanto a tempi di intercorrenza piuttosto lunghi e regolari, sussistono, nelle aree sismogenetiche sotto indagine, tempi di intercorrenza brevi e irregolarmente distribuiti nel tempo.

Di questo tipo sono i terremoti forti delle aree sismogenetiche italiane, anche di quelle ultimamente definite nella mappa sismica, pur considerate omogenee come meccanismo di generazione dei terremoti.

Focalizzare l'attenzione sui tempi di intercorrenza indipendentemente dal loro ordine e dalla loro correlazioni significa già accettare l'ipotesi che la sequenza sismica sia costituita da tempi di intercorrenza indipendenti. Dal punto di vista matematico, accettare questa ipotesi significa muoversi nell'ambito dei renewal processes dotati di un sol passo di memoria con prevedibilità dipendente solo dall'ultimo tempo trascorso.

Il catalogo viene letto come sequenza dei tempi di intercorrenza dei terremoti forti (ad es. magnitudo >5.3) che di solito vengono ordinati per comodità per valori crescenti. Sia $f_\tau(t_0)$ la loro densità di probabilità; $F_\tau(t_0)$ la loro distribuzione, t_0 essendo il generico valore della variabile aleatoria τ , il tempo contato a partire da un terremoto fino al successivo.

La background prediction viene tipicamente espressa con due grandezze riguardanti rispettivamente l'immediato e il medio termine:
l'hazard rate

$$\lambda(t_0) = \frac{f_\tau(t_0)}{1 - F_\tau(t_0)} \quad (1)$$

e la probabilità di un terremoto nel prossimo Δt a partire da t_0

$$P_{\Delta t_0|t_0} = \frac{F_\tau(t_0 + \Delta t_0) - F_\tau(t_0)}{1 - F_\tau(t_0)}. \quad (2)$$

Entrambe sono condizionate dal tempo t_0 trascorso dall'ultimo evento. Saranno brevemente indicate con λ e P .

La coesistenza di intertempi sia brevi che lunghi e la loro conseguente dispersione con coefficiente di variazione circa uguale a 1 può far apparire ragionevole l'ipotesi poissoniana. Tuttavia altre ipotesi possono essere ragionevolmente accettate e addirittura risultare vincenti nel confronto.

In questo lavoro proponiamo l'ipotesi di un terremoto caratteristico disturbato da una specie di rumore, rappresentabile a sua volta come processo poissoniano non prevedibile, cosicché il processo globale (sempre limitato ai terremoti forti) potrebbe essere modellato secondo un renewal process con distribuzione mistura dei failure times: esponenziale per i tempi particolarmente brevi, Weibull con hazard rate crescente per i tempi lunghi che per brevità diremo propri del terremoto caratteristico.

Ovviamente anche l'ipotesi di renewal process andrebbe cautamente argomentata. Qui ci limitiamo a giustificare perchè si scelga la mistura ex-w (esponenziale-Weibull). La struttura analitica della ex-w garantisce che l'hazard rate non sia sempre crescente come generalmente viene ipotizzato per il terremoto caratteristico, ma che, dopo un picco di pericolosità, tenda a un valore asintotico finito λ_∞ . In altre parole, dopo un lungo silenzio sismico l'aspettativa di un terremoto imminente non continua a crescere indefinitamente, ma si stabilizza attorno a un valore che si dimostra essere un po' maggiore dell'hazard rate costante del processo poissoniano, con

$$\lambda_\infty = \frac{f_{ex}}{1 - F_{ex}}, \quad (1')$$

dove f_{ex} e F_{ex} sono rispettivamente densità e distribuzione della componente esponenziale della mistura.

Si noti esplicitamente che la mistura non pone una soglia di netta separazione fra i due tipi di terremoti. Ciò non solo evita di scegliere una soglia, il che sarebbe problematico e forse poco veritiero, ma anche assicura il voluto comportamento asintotico. Infatti, se si assumesse la distribuzione Weibull per le sole intercorrenze lunghe, ad esse sarebbe associato un hazard rate sempre crescente con t_0 fino alla certezza di un terremoto immediato.

La forma analitica della mistura ex-w è

$$1 - F_{\tau}(t_0) = (1 - p) \exp[-bt_0] + p \exp[-(\rho t_0)^{\alpha}] \quad (3)$$

Il periodo di ritorno (tempo medio di intercorrenza) è

$$\mu = (1 - p) \mu_1 + p \mu_2 \quad (4)$$

dove μ_1 e μ_2 sono i due periodi di ritorno componenti e p è il peso del terremoto caratteristico.

L'uso della ex-w comporta però difficoltà e incertezze dovute alla stima dei quattro parametri p , b , ρ , α tanto più che le aree proposte dalla nuova mappa sismica italiana sono piuttosto ristrette e perciò povere di dati. Un espediente che abbiamo adottato e che ha migliorato notevolmente la stabilità delle elaborazioni numeriche è suggerito dalla somiglianza di comportamento degli hazard rates di distribuzioni diverse, a parità dei parametri $k_1 = \mu_1/\mu$, $k_2 = \mu_2/\mu$, p , α .

Se perciò trasformiamo la variabile tempo t_0 nella sua forma adimensionale

$$h = \frac{t_0}{\mu} \quad (5)$$

la (4) diviene

$$1 = (1 - p) k_1 + p k_2 \quad (6)$$

e la famiglia di distribuzioni (3) con medie diverse, a parità di k_1 , k_2 , p , α , divengono

$$1 - F(h) = (1 - p) \exp\left[-\frac{h}{k_1}\right] + p \exp\left\{-\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \frac{h}{k_2}\right]^{\alpha}\right\} \quad (7)$$

tutte con media unitaria e perciò con tre parametri da stimare. Questi parametri hanno il pregio di un riscontro diretto con i dati, essendo k_1 , e k_2 i due periodi di ritorno componenti (adimensionali), p (non indipendente dai precedenti) il peso del terremoto caratteristico e α la sua dispersione perchè il coefficiente di variazione della Weibull è

$$\text{cov}_w = \left\{ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^2} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Proprio il parametro α mostra tuttavia instabilità di stima. Si è perciò deciso di procedere alla stima degli altri parametri, con α di volta in volta costante. Ripetute le analisi per diversi valori di α , si è proceduto poi alla scelta del valore più idoneo. I valori di α indagati sono suggeriti dai cataloghi secondo la (8).

Perciò i parametri da stimare sono solo due, i due periodi di ritorno k_1 , e k_2 , mentre, grazie alla (6), è

$$p = \frac{1 - k_1}{k_2 - k_1} \quad (9)$$

Una volta stimati i parametri adimensionali è immediato tornare agli effettivi termini temporali. Detto $\tilde{\lambda}$ l'hazard rate adimensionale è, per la (5),

$$\tilde{\lambda}(h) = \mu \lambda(t_0); \quad P_{\Delta t_0|t_0} = P_{\Delta h|h} \quad \text{con} \quad \Delta t_0 = \mu \Delta h \quad (10)$$

Il valore asintotico del hazard rate è:

$$\lambda_{\infty} = 1/\mu_1 \quad \tilde{\lambda}_{\infty} = 1/k_1 \quad (1'')$$

Analogamente è

$$\tilde{F}(h) = F_{\tau}(t_0) \quad \text{e} \quad \tilde{f}(h) = \mu f_{\tau}(t_0). \quad (11)$$

Sono espressivi e utili i grafici delle Figure 1-5. Essi visualizzano il rischio immediato per diversi terremoti considerati con la mistura, avendo fissato $\alpha=4$. Sono parametrizzati per valori di p crescenti, cioè si estendono dalla mancanza del terremoto caratteristico ($p = 0$) alla mancanza del “disturbo” ($p = 1$). Il periodo di ritorno k_2 del terremoto caratteristico viene scandagliato da 1.2 a 2 perchè questo è il range di valori in cui k_2 solitamente varia nelle aree considerate. I grafici, come si è detto, valgono qualunque sia il periodo di ritorno; l'ascissa $h = 1, 2, 3 \dots$ significa una, due, tre volte il periodo di ritorno.

L'insieme delle distribuzioni considerate fornisce un panorama che può considerarsi abbastanza esaustivo dei terremoti che vogliamo considerare. Esse costituiscono un panorama di “verità” congetturali, rispetto alle quali abbiamo il problema di valutare la credibilità delle procedure di stima della previsione a partire dal catalogo, cioè da un unico campione a disposizione. Qui di seguito mettiamo a confronto quattro procedure di stima.

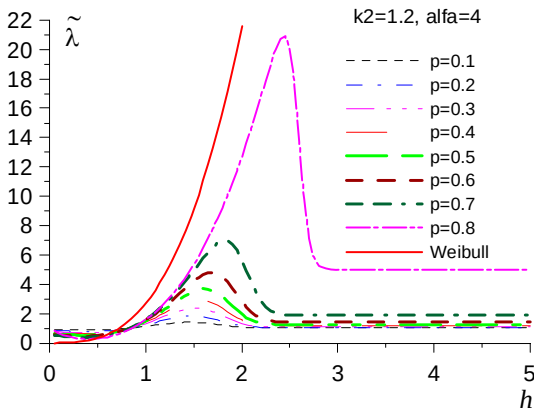


Figura 1.

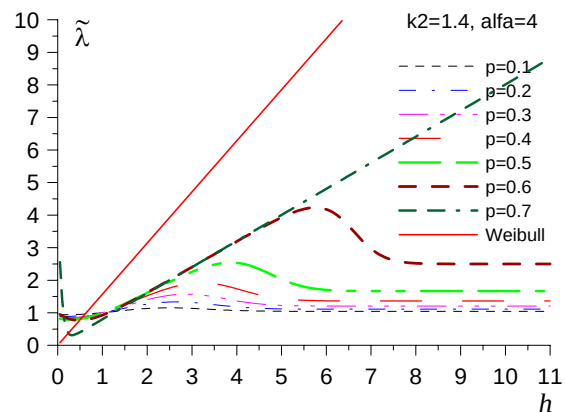


Figura 2.

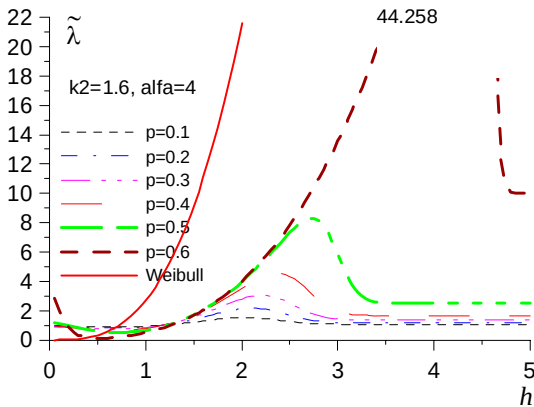


Figura 3.

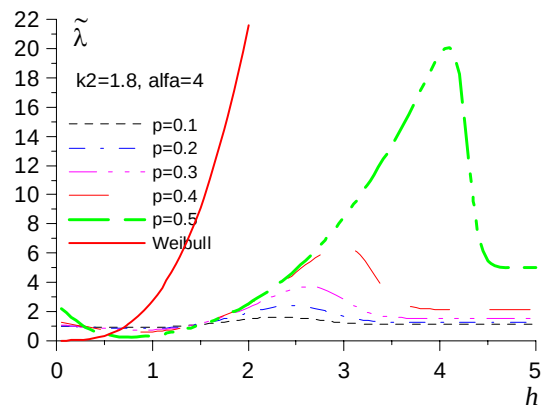


Figura 4.

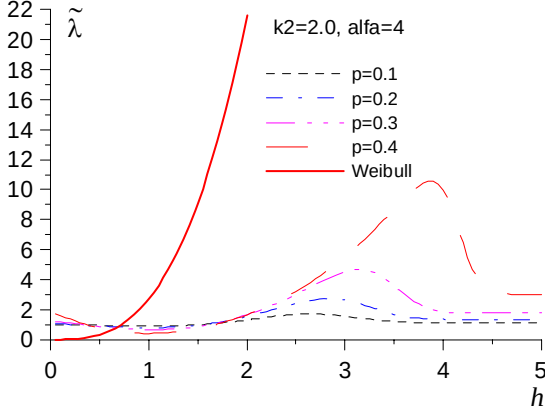


Figura 5.

2 PROCEDURE DI STIMA A CONFRONTO

La prima consiste nell'assumere come modello matematico la forma analitica (7) e nell'usare il classico metodo di massima verosimiglianza (ML) per la stima dei parametri.

La seconda procedura, che diremo di soglia (SO), presuppone anch'essa lo stesso modello matematico e sfrutta direttamente il significato dei suoi parametri stimando k_1 , e k_2 come medie dei tempi di intercorrenza rispettivamente minori e maggiori di 1, sempre accettando il vincolo (9) per la conseguente stima di p e il coefficiente di variazione degli intertempi > 1 per la stima di α .

La terza procedura usa il metodo di massima entropia (ME). Essa pur non scegliendo una forma analitica per la distribuzione, vi è condotta per via del principio stesso, il quale consta nel voler escludere qualunque informazione che non sia contenuta nei dati; tutto ciò viene soddisfatto da una forma esponenziale generalizzata in cui il grado dell'esponente dipende dal numero dei momenti presi in considerazione. Il numero ottimo di momenti è quello che rende minimo il valore dell'entropia differenziale (Tagliani 1989, 1990). Si presenta in questo caso, come sempre qualora si vogliano usare i soli dati sperimentali, il problema della previsione attorno al dato estremo. Per il campione il massimo prevedibile è il massimo osservato e nessun campione può dare informazioni sul comportamento asintotico della grandezza da stimare. Informazioni *ad hoc* vanno aggiunte. Nel metodo di ME va assegnato il valore massimo ritenuto possibile. La struttura analitica comporta un valore di hazard rate sempre crescente. La identificazione di un massimo ritenuto possibile e l'adozione di un hazard rate sempre crescente sono due inconvenienti per una stima credibile nei valori estremi. Il metodo è tuttavia utile per avere un'idea qualitativa dell'hazard rate (prima dell'estremo) in quanto esso è molto sensibile ai dati.

Una quarta procedura, empirica (EMP), legge i valori λ^* dell'hazard rate sulla poligonale, che è la cumulata sperimentale F^* resa continua, lineare a tratti, senza smussamento alcuno per non introdurre valutazioni soggettive. Il λ^* è

$$\lambda^*(h) = \frac{(tg\theta)_h}{1 - F^*(h)} \quad (12)$$

essendo $(tg\theta)_h$ il coefficiente angolare del lato di poligonale cui h appartiene. La (12) non può ovviamente fornire il comportamento asintotico voluto in quanto tende all' ∞ per h tendente al valore massimo di intertempo osservato. Ma per valori opportunamente minori la (12) fornisce stime da confrontare utilmente con le precedenti. In vicinanza dell'estremo della poligonale (massimo osservato) ci faremo guidare dalla realtà congetturale (7) per ottenere il comportamento asintotico voluto; usando, in quest'ultimo range, gli stessi valori del metodo SO.

3 CREDIBILITÀ DELLE PROCEDURE

In precedenti lavori (Grandori et al. 1998, 2003, 2006; Guagenti et al. 2003, 2004) si è introdotto, ci sembra con profitto, il concetto di credibilità così definito. Sia A la grandezza da stimare, A° il suo valore nella verità congetturale F° , $\hat{A}_r$ il suo valore stimato con la procedura r . Qui e nel seguito l'indice $^\circ$ e il soprasegno $^{\wedge}$ apposti alla grandezza ne indicano il valore vero e il valore stimato. Definiamo credibilità della procedura r per la stima di A , rispetto alla verità congetturale F° , la probabilità

$$\Delta_r^\circ = \Pr\{A^\circ - kA^\circ \leq \hat{A}_r \leq A^\circ + kA^\circ\}. \quad (13)$$

In altre parole Δ_r° è la probabilità che l'errore percentuale di stima sia minore di k in valore assoluto. Si possono così mettere a confronto diverse procedure rispetto a un consistente numero di verità congetturali e giudicare, in tale ambito, quale sia migliore per la stima di A . Non si tratta di preferibilità in senso assoluto ma, se il ventaglio delle verità congetturali è rappresentativo del *ragionevolmente possibile*, è criterio utile in senso operativo.

In questo lavoro le grandezze da stimare sono λ e P , che riassumono, come si è detto, la previsione al trascorrere del tempo t_0 .

Il calcolo della (13) viene condotto con simulazione Monte Carlo, ipotizzando diverse verità congetturali F° . Nelle tabelle tali distribuzioni sono contraddistinte dal solo valore k_2° in quanto il confronto avviene a parità di p e di α ; essi hanno valore $p=0.5$ e $\alpha=4$ che appaiono ricorrenti in media nelle aree indagate.

Le Tabelle 1 e 2 mostrano i valori della credibilità Δ per la stima di λ e P con i due metodi proposti di ML e SO. I campioni in queste elaborazioni esplorative hanno numerosità 100 con $k=0.3$. Tale valore di k evita di essere troppo o troppo poco severi nell'accettazione dell'errore, cioè di avere credibilità tutte vicine a zero o all'unità e quindi poco confrontabili. Anziché assumere un indice medio di credibilità, si è preferito riportarne i valori al variare di h , con scansione uguale a mezzo periodo di ritorno, in questo modo si evidenzia quando la previsione sia più o meno affidabile. La colonna indicata con h_{max} dà le medie delle previsioni eseguite nei valori di h massimi osservati nei singoli campioni.

Tab. 1 Valori di $\Delta = \Pr \left\{ \left| \frac{\hat{\lambda}(h) - \lambda^{\circ}(h)}{\lambda^{\circ}(h)} \right| < 0.3 \right\}$ con numerosità campionaria $\nu = 100$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.99	0.89	0.94	0.49	0.87	0.890
	SO	1.00	0.02	0.22	~0.0	~0.0	~0.0
1.4	ML	0.96	0.93	0.81	0.74	0.45	0.50
	SO	1.00	0.76	0.67	0.93	~0.0	0.09
1.6	ML	0.92	0.93	0.76	0.73	0.74	0.82
	SO	1.00	0.94	0.84	0.83	0.88	0.87
1.8	ML	0.61	0.80	0.65	0.64	0.64	0.92
	SO	0.57	0.83	0.71	0.71	0.71	0.80

Tab. 2 Valori di $\Delta = \Pr \left\{ \left| \frac{\hat{P}(h) - P^{\circ}(h)}{P^{\circ}(h)} \right| < 0.3 \right\}$ $\Delta h=0.1$ e $\nu = 100$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.99	0.91	0.96	0.59	0.89	0.90
	SO	1.00	0.03	0.51	~0.0	~0.0	0.01
1.4	ML	0.97	0.93	0.86	0.80	0.53	0.530
	SO	1.00	0.75	0.75	0.98	~0.0	0.11
1.6	ML	0.92	0.91	0.79	0.84	0.85	0.88
	SO	1.00	0.93	0.87	0.90	0.95	0.97
1.8	ML	0.61	0.77	0.68	0.71	0.75	0.98
	SO	0.54	0.82	0.73	0.75	0.80	0.94

Le tabelle mostrano in alcuni casi forti divaricazioni fra le credibilità delle due stime. A quale delle due daremo maggior fiducia? Le numerose analisi che abbiamo condotto hanno mostrato che il metodo SO ha maggior credibilità quando il rapporto $r = k_2/k_1$ è elevato, come appunto accade nei casi di 3^a e 4^a riga. Il fatto si commenta grazie al significato del rapporto r : esso è indice di quanto sia separato il terremoto caratteristico dal disturbo, in termini di periodo di ritorno. Qualora sia $k_2 \gg k_1$ (con r dell'ordine di almeno 4) il metodo SO, che legge direttamente i valori in coda del campione, opera meglio del metodo ML che è sensibile ai dati più numerosi.

Se invece r è piccolo (v. 1a riga di Tab. 1 e 2) il metodo SO cade in difetto. Ciò corrisponde al fatto che le code delle due distribuzioni componenti la mistura siano molto sovrapposte, rendendo con ciò inattendibile il metodo SO.

Qualora le credibilità siano dello stesso ordine, i due metodi si aiutano, per così dire, nell'interpretazione dei dati. Sfortunatamente le aree sismogenetiche italiane sono alquanto povere di dati. Pertanto in Tabella 1' e in tabella 2'

sono riportate le credibilità quando i campioni presentano una numerosità realistica mente più bassa ($\nu=20$). I valori di credibilità sono ovviamente piuttosto piccoli, ma confermano la tendenza precedentemente rilevata.

Tab. 1' Valori di $\Delta = \Pr\left\{\left|\frac{\hat{\lambda}(h) - \lambda^{\circ}(h)}{\lambda^{\circ}(h)}\right| < 0.3\right\}$ con numerosità campionaria $\nu = 20$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.71	0.57	0.57	0.19	0.50	0.49
	SO	0.91	0.21	0.37	~0.0	~0.0	~0.0
1.4	ML	0.67	0.61	0.46	0.38	0.25	0.36
	SO	0.91	0.65	0.54	0.68	0.14	0.70
1.6	ML	0.58	0.59	0.41	0.39	0.34	0.69
	SO	0.87	0.70	0.54	0.54	0.58	0.69
1.8	ML	0.33	0.41	0.36	0.34	0.34	0.43
	SO	0.38	0.49	0.38	0.38	0.40	0.57

Tab. 2' Valori di $\Delta = \Pr\left\{\left|\frac{\hat{P}(h) - P^{\circ}(h)}{P^{\circ}(h)}\right| < 0.3\right\}$ $\Delta h=0.1$ e $\nu = 20$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.78	0.58	0.59	0.24	0.51	0.49
	SO	0.90	0.20	0.37	~0.0	~0.0	~0.0
1.4	ML	0.70	0.58	0.53	0.45	0.28	0.28
	SO	0.92	0.63	0.55	0.68	0.14	0.70
1.6	ML	0.58	0.58	0.44	0.48	0.48	0.77
	SO	0.88	0.69	0.50	0.53	0.57	0.63
1.8	ML	0.32	0.41	0.34	0.34	0.38	0.79
	SO	0.41	0.50	0.36	0.35	0.36	0.59

Le analoghe credibilità del metodo empirico sono molto più basse; esse sono dell'ordine di 0.25 per la stima di λ e 0.45 per la stima di P . Il metodo empirico va comunque tenuto presente in quanto esente da eventuali errori di modellazione matematica, anche se è proprio l'assenza di un modello unificante che esalta il ruolo della variabilità statistica. Il metodo empirico dà comunque utili indicazioni.

Inoltre tutti e tre i metodi (ML, SO, EMP) si mostrano molto affidabili per decidere se il processo sia oppure no di tipo poissoniano. Infatti un secondo tipo di credibilità risponde al dubbio inizialmente espresso se l'ipotesi esponenziale sia effettivamente da scartare.

Poiché nell'esponenziale l'hazard rate ha valore costante (uguale a 1 nella formulazione adimensionale), se, per qualche valore di h , la stima dell'hazard rate è molto maggiore dell'unità l'ipotesi poissoniana appare poco credibile. Definiamo credibilità dell'ipotesi poissoniana rispetto ad altra con hazard rate variabile l'indice

$$\Delta_{\delta} = \Pr\{\lambda(h) - 1 < k_{\delta}\}. \quad (14)$$

La Tabella 3 fornisce i valori di Δ_{δ} per $k_{\delta}=2$ che corrisponde a un hazard rate triplo rispetto a quello poissoniano. Essa è molto eloquente. I tre metodi sono molto affidabili nel denunciare o la presenza di un picco di pericolosità (righe centrali) o la sua assenza (ultima riga) o una sua debole presenza (1^a riga). Si vedano in proposito i grafici corrispondenti di Figg. 1-4.

In Tabella 3' vengono riportati i valori di Δ_{δ} per $k_{\delta}=2$ corrispondenti a $\nu = 20$, anche in questo

caso tutti e tre i metodi sono sensibili nel denunciare se sussiste l'ipotesi poissoniana e in quale istante.

Tab. 3 Valori di $\Delta_{\delta} = \Pr\{\hat{\lambda}(h) - 1 > 2\}$ e $\nu = 100$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.00	0.00	0.41	0.21	0.02	0.04
	SO	0.00	0.00	0.00	0.98	0.89	0.15
	EMP	0.01	0.08	0.28	0.21	0.24	0.15
1.4	ML	0.00	0.00	0.10	0.87	0.41	0.44
	SO	0.00	0.00	0.00	0.91	0.99	0.71
	EMP	0.02	0.04	~0.0	0.50	0.64	0.99
1.6	ML	0.00	0.00	0.00	0.62	0.97	0.94
	SO	0.00	0.00	0.00	0.36	0.99	0.99
	EMP	0.02	0.02	0.09	0.35	0.81	0.99
1.8	ML	0.00	0.00	0.00	0.12	0.79	1.00
	SO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.71	1.00
	EMP	0.01	~0.0	0.04	0.18	0.50	1.00
0(exp)	ML	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EMP	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.00

Tab. 3' Valori di $\Delta_{\delta} = \Pr\{\hat{\lambda}(h) - 1 > 2\}$ e $\nu = 20$

$k_2 \backslash h$	metodi	0.5	1	1.5	2	2.5	h_{max}
1.2	ML	0.00	0.00	0.42	0.46	0.25	0.47
	SO	0.00	0.00	~0.0	0.79	0.68	0.71
	EMP	0.01	0.08	0.28	0.21	0.24	0.15
1.4	ML	0.00	0.00	0.29	0.67	0.54	0.77
	SO	0.00	0.00	~0.0	0.74	0.84	0.88
	EMP	0.02	0.04	~0.0	0.50	0.64	0.99
1.6	ML	0.00	0.00	0.12	0.54	0.74	0.87
	SO	0.00	0.00	~0.0	0.45	0.84	0.88
	EMP	0.02	0.01	0.09	0.35	0.81	0.99
1.8	ML	0.00	0.00	~0.0	0.32	0.64	0.86
	SO	0.00	0.00	~0.0	0.21	0.58	0.76
	EMP	0.01	0.01	0.04	0.18	0.50	1.00
0(exp)	ML	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EMP	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.00

4 ROBUSTEZZA DEL MODELLO

Il modello mistura ex-w gode inoltre della proprietà di robustezza nel senso che, grazie alla sua

adattabilità, riesce a fornire una previsione attendibile anche quando la distribuzione da cui il campione è estratto non sia una mistura ma sia per esempio una esponenziale, mentre non accade il viceversa come già indicato dall'esame di Δ_δ . In altre parole il modello ex-w si comporta bene anche se deve interpretare una “verità” diversa dalla mistura. Proviamo, infatti, a estrarre 1000 campioni dall'esponenziale e stimiamo λ con il modello ex-w facendoci suggerire il valore di α dal coefficiente di variazione degli intertempi maggiori di 1. La credibilità $\Delta_{\text{ex-w}}^{\text{ex}}$ è riportata in Tabella 4 per la stima di λ e di $P_{0.1|h}$; osserviamo che la mistura rimane credibile anche qualora la verità fosse esponenziale: si adatterebbe a dare piccole variabilità di previsione. La sua simmetrica $\Delta_{\text{ex}}^{\text{ex-w}}$ ha valori accettabili solo nel caso in cui il processo genitore abbia valori di α poco maggiori di 1. Se il processo genitore avesse $\alpha > 2$ la credibilità dell'interpretazione poissoniana crollerebbe a zero.

Tab. 4 Valori di $\Delta_{\text{ex-w}}^{\text{ex}}$ per le stime ML di λ e di $P_{0.1|h}$; $\nu = 100$

h	0.5	1	1.5	2	2.5	$h_{\max}$
λ	0.99	1.000	0.980	0.92	0.83	0.54
$P_{0.1 h}$	1.00	1.00	0.98	0.92	0.83	0.56

Commentiamo infine l'efficacia delle procedure espone, nel caso di campioni più poveri che sono di effettivo interesse. Qualora si scenda a numerosità 20 (Tab. 4') o perfino 10 le credibilità ovviamente diminuiscono ma non drammaticamente, di circa il 25%, e consentono ancora il confronto fra le procedure che non viene sostanzialmente alterato, come rapporto fra credibilità, rispetto a quanto esposto finora.

Tab. 4' Valori di $\Delta_{\text{ex-w}}^{\text{ex}}$ per le stime ML di λ e di $P_{0.1|h}$; $\nu = 20$

h	0.5	1	1.5	2	2.5	$h_{\max}$
λ	0.92	0.95	0.70	0.57	0.48	0.42
$P_{0.1 h}$	0.94	0.95	0.71	0.59	0.50	0.44

5 APPLICAZIONI

Il Progetto S2 nell'ambito dei “Progetti Sismologici di Particolare Interesse per il DPC_INGV-DPC prevedeva l'assegnazione di probabilità di accadimento di eventi caratteristici sull'intero territorio italiano.

Per l'applicazione dei tre metodi, i dati richiesti sono gli intertempi tra eventi accaduti in aree sismogenetiche omogenee. Normalmente tali dati sono riportati nei cataloghi storici degli eventi sismici. Nel progetto S2 il catalogo degli eventi storici assunto è il catalogo CPTI04 (CPTI Working Group, 2004. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani–Versione 2004 (CPTI04) INGV, Bologna), mentre l'associazione eventi storici da catalogo con le aree sismogenetiche (SASources) è stata fornita nell'ambito del Progetto S2-Task 1, INGV-DPC Progetti Sismologici di Particolare Interesse per il DPC Coordinatori Nazionali: D. Slejko e G. Valensise. Poiché la previsione di accadimento deve riguardare eventi caratteristici la magnitudo considerata è elevata: Si sono presi in considerazione i terremoti con $M_{\text{aw}} \geq 5$ e, per garantire una finestra temporale affidabile per qualsiasi area si sono presi in considerazione gli eventi avvenuti a partire dal 1600 fino a tutto 2002.

L'applicazione dei tre metodi alla nuova divisione areale SASources composta da 74 aree sismogenetiche ha sofferto per la scarsa (e a volte quasi nulla) numerosità di eventi caratteristici associati ad ognuna di esse. I ricercatori della Task 1 hanno collaborato con la nostra unità di ricerca operando un'ulteriore associazione delle 74 aree sismogenetiche a 8 macro regioni (MR): ad ogni MR sono associate aree che possono essere considerate omogenee come meccanismo di

accadimento.

In Tabella 5 sono riportate le coordinate delle 8 macro regioni, mentre la Figura 6 riporta sia i confini delle macro regioni sia le aree ad esse associate.

Tab. 5

MR1		MR2		MR3		MR4		MR5		MR6		MR7		MR8	
Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.
8.16	46.55	9.31	45.35	13.45	42.54	9.26	44.29	17.29	39.98	14.11	41.43	15.36	36.82	11.25	38.63
7.08	46.29	10.67	45.27	13.44	42.55	9.66	44.67	17.28	39.99	14.12	41.43	15.33	37.58	13.21	38.65
6.55	45.55	11.27	45.32	13.15	42.94	9.96	44.50	16.42	39.73	14.25	41.78	15.32	37.85	14.95	38.70
6.41	45.16	11.69	45.56	12.82	43.31	10.73	44.21	16.19	40.01	15.24	41.21	15.12	38.31	15.32	37.85
6.57	44.50	12.28	45.80	12.52	43.47	10.99	44.20	16.03	40.34	15.79	40.79	15.57	38.43	14.99	37.83
7.26	43.72	12.62	45.98	12.09	43.75	11.31	44.14	15.79	40.80	16.03	40.35	15.83	38.73	14.89	37.75
7.85	43.74	12.93	46.08	11.31	44.14	12.09	43.75	15.24	41.21	16.19	40.01	15.90	39.02	14.87	37.62
8.54	43.84	13.47	45.80	10.99	44.21	12.52	43.47	14.26	41.78	16.42	39.73	15.85	39.57	15.06	37.56
8.48	44.12	14.40	45.27	10.73	44.21	12.82	43.31	14.25	41.78	16.07	39.63	16.07	39.63	15.33	37.58
7.84	44.11	14.82	45.72	9.96	44.50	13.15	42.94	14.28	41.86	15.76	40.01	16.07	39.63	15.37	36.60
7.59	44.97	13.65	46.49	9.66	44.67	13.44	42.55	13.53	42.44	15.54	40.45	16.42	39.73	14.71	36.56
7.29	45.63	12.96	46.58	9.29	44.31	13.53	42.44	13.44	42.55	14.97	40.91	17.29	39.99	11.31	38.06
7.68	45.97	11.06	46.18	9.26	44.29	14.28	41.86	13.45	42.54	14.11	41.43	18.29	38.96	11.25	38.64
8.38	46.32	9.67	45.81	8.47	44.70	14.12	41.43	14.15	42.58			18.69	38.13		
8.16	46.55	9.30	45.59	9.31	45.27	13.61	41.52	14.47	42.53			17.84	37.07		
		9.31	45.35	9.69	45.28	13.38	41.47	15.72	42.22			16.55	36.82		
				11.48	45.03	12.68	42.00	16.45	41.98			15.36	36.82		
				12.14	44.82	11.83	43.03	16.87	41.38						
				12.45	44.52	10.93	43.69	17.23	40.67						
				13.89	43.58	10.23	43.62	17.29	39.98						
				14.05	43.19	10.07	43.90								
				14.15	42.58	9.26	44.29								
				13.45	42.54										

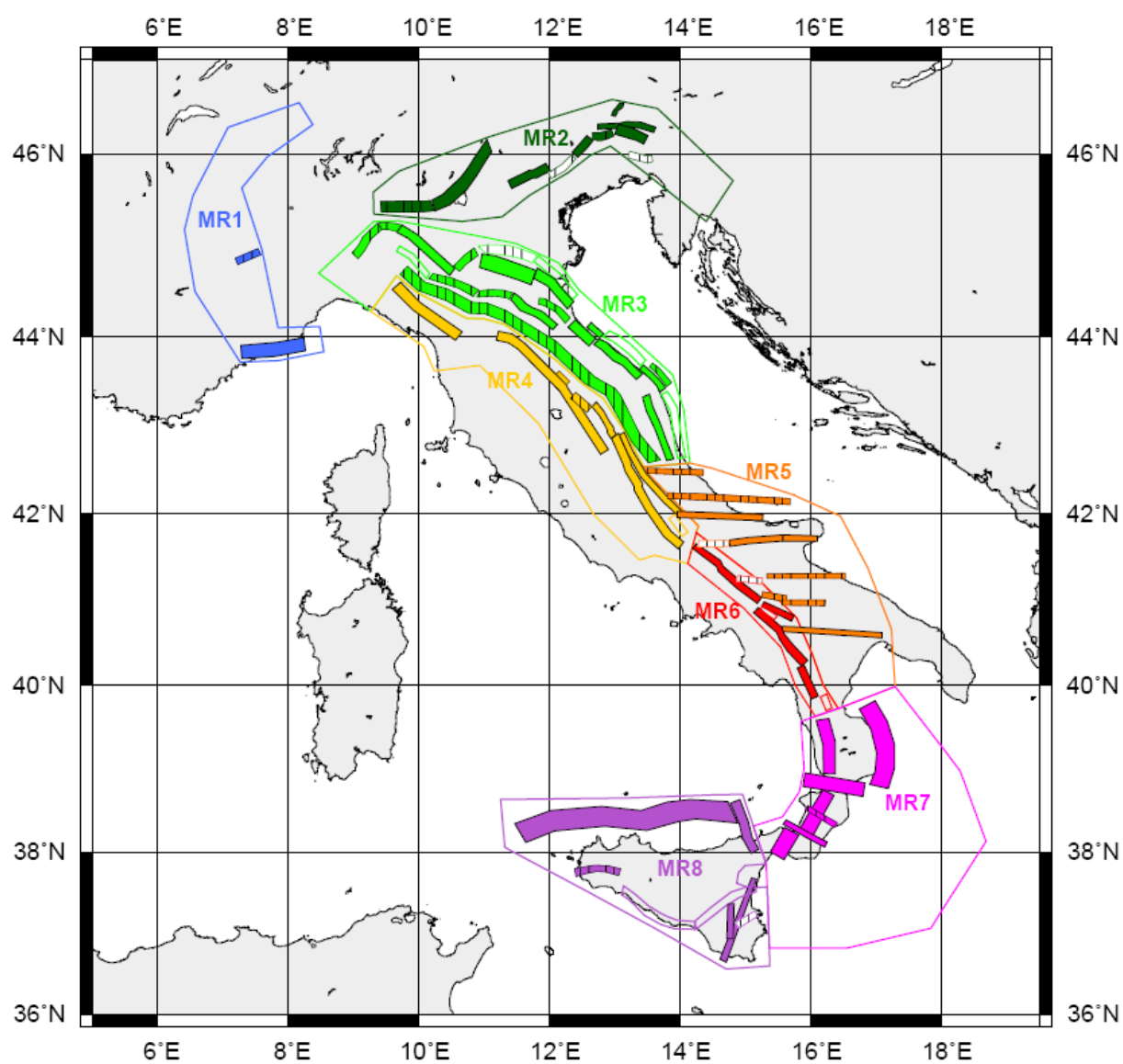


Fig. 6 Macro-Regioni MR e Aree Sismogenetiche SA

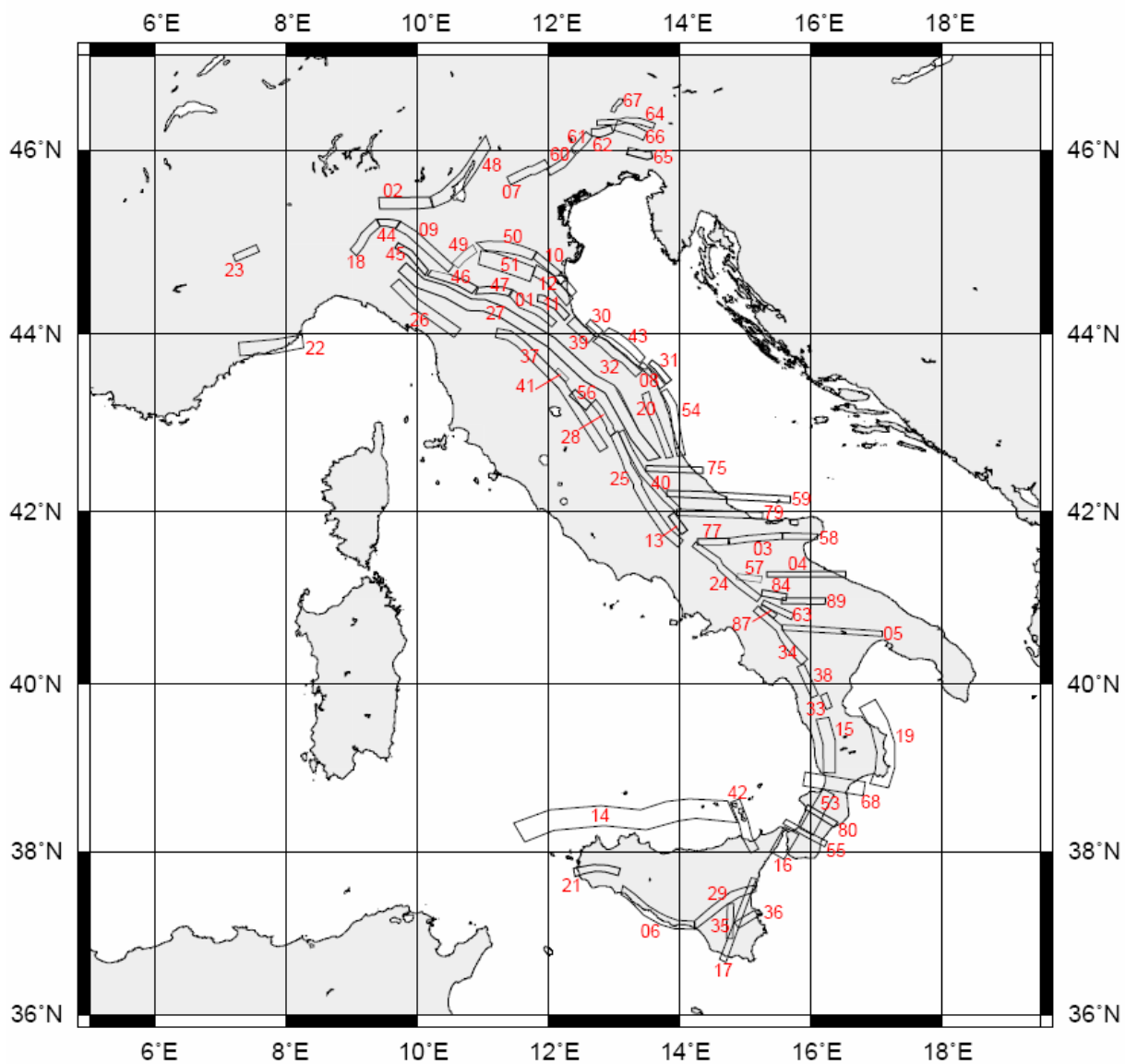


Fig. 7 Aree sismogenetiche secondo la numerazione SASource (INGV).

I tempi di intercorrenza sono stati calcolati per ogni singola area appartenente ad una MR, solo successivamente associati in un unico dataset caratterizzante la MR. In questo modo le caratteristiche areali delle intercorrenze vengono rispettate.

I dataset così costruiti hanno rappresentato la base per l'applicazione dei tre metodi presentati nei paragrafi precedenti.

5.1 Applicazione dei metodi proposti alle otto macro-regioni

Nel seguente paragrafo sono riportati tutti i risultati elaborati per le 8 MR studiate.

Per ogni macro regione vengono riportate le tabelle con il relativo catalogo in anni e adimensionalizzato. Nelle tabelle sono riportati anche il periodo di ritorno μ della MR, il valore p che misura l'evidenza del terremoto caratteristico nella MR e il valore asintotico λ_∞ ad essa associato. I grafici forniscono la stima $\hat{F}(h)$ e $\hat{\lambda}(h)$ con i diversi metodi. Per la loro formulazione in termini temporali si ricordino le (5) (10) (11).

Le figure evidenziano per quasi tutte le MR come l'esponenziale non sia adeguata (specialmente in coda), mentre paiono aderire ai dati le distribuzioni ex-w stimate con i metodi ML e SO e sorrette dalle analisi di credibilità precedentemente svolte. Dall'esame del coefficiente di variazione degli intertempi >1 e della funzione di massima verosimiglianza i valori suggeriti per il parametro α sono compresi fra 4 e 6; solo per MR4 il valore suggerito è $\alpha=2$.

Nelle figure è tracciato anche λ^* ottenuto col metodo empirico. Quel che è contributo specifico e utile del metodo empirico è l'aderenza ai dati non soggetta a errori di modellazione. Nei casi esaminati il metodo empirico rivela, in modo sia pur rozzamente non smussato, un andamento plurimodale di λ , a cui il modello matematico non potrebbe dar luogo. I dati invece paiono condurre a quell'andamento, dando luogo a “*punti salienti*” con pericolosità più alte di come il modello vorrebbe. Di ciò occorre tener conto anche se non come effettiva stima puntuale quantitativa. Questa pertanto non viene riportata in tabella.

Le figure mostrano anche le stime $\hat{\lambda}(h)$ di massima entropia che confermano qualitativamente l'andamento di λ .

Le probabilità di accadimento $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni) con t_0 valutato per ogni area sismogenetica assumendo come data di riferimento la fine del 2002 (ultima data riportata nel catalogo utilizzato) sono riportate in tabella suddivise per area. Esse forniscono perciò previsioni che si sarebbero fatte nel 2003. Le elaborazioni sono svolte in forma adimensionale, mentre i risultati qui riportati sono espressi in anni per agevolare il confronto tra le differenti aree. Nel metodo ME a causa del troncamento della distribuzione ad un dato valore limite, spesso il valore di probabilità non viene riportato ed è sostituito dalla scritta “fuori range”. Altre volte la dizione “indeterminato” indica che siamo al limite della stabilità numerica in quanto la forma numerica asintotica di λ è del tipo 0/0. Ciò accade dove t_0 è molto grande; si intende che in tal caso la previsione si calcola come nell'ipotesi poissoniana con hazard rate dato dalla (1’’).

Nelle tabelle sono elencati i dati relativi alle aree sismogenetiche che presentano almeno un evento di $M_{aw} > 5.3$, pertanto non tutte le aree appartenenti ad una macro regione sono elencate.

5.1.1 MR1

La macro regione MR1=Western Alps è raffigurata in Figura 6 con il colore blu e raggruppa due aree sismogenetiche: SA22 e SA23 (come da numerazione di Figura 7).

In Tabella 6 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

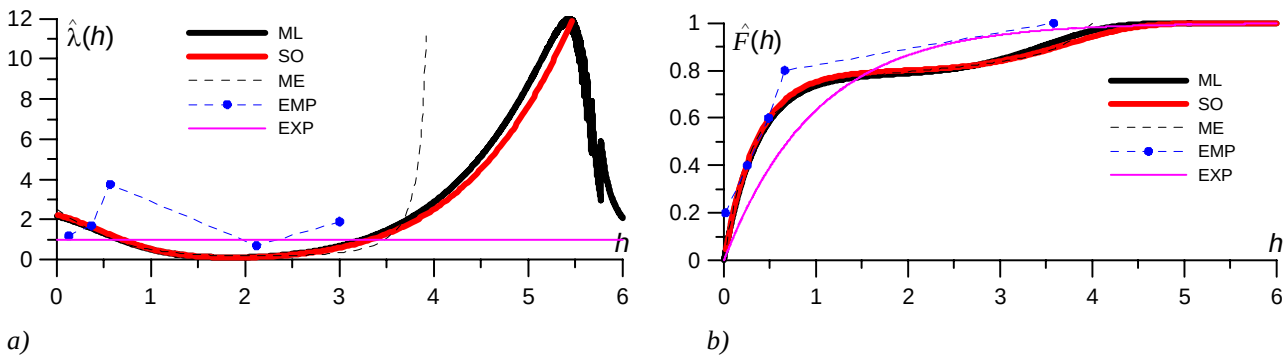
Tab. 6

MR1_ tempi di intercorrenza in anni							
0.874467	12.37671	23.59352	32.15384	174.0233			
$\mu = 48.60436$ $p = 0.2155$ $\lambda_{\infty} = 0.057246$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 2.7824$							
MR1_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.017992	0.254642	0.48542	0.661542	3.580404			

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=6$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 4.0 ottenendo un numero ottimo di momenti = 1.

La previsione va presa con cautela per la scarsa numerosità del campione. I valori di $\hat{\lambda}$ stimati con i diversi metodi non sono in generale molto diversi da quello poissoniano fino a un tempo d'attesa circa uguale al massimo osservato, mentre se ne discostano decisamente per attese maggiori. La Figura 8 mostra in modo evidente come i metodi proposti siano in grado di evidenziare entrambe le tendenze.

Per quanto riguarda SO, l'elevato valore di r (di circa 10) fa ritenere attendibile anche la stima di soglia.



a)
Fig. 8

In Tabella 7 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.7 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR1		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA22	$t_0=115$						
ML		2.42E-02	5.55E-02	0.123149	0.2249110	0.4674350	0.96663
SO		1.65E-02	3.99E-02	9.00E-02	0.1560858	0.3411289	0.8898991
ME		2.35E-02	3.96E-02	8.33E-02	0.1347154	0.3073436	fuori range
SA23	$t_0=194$						
ML		0.262917	0.4778	0.770954	0.927526	0.996741	1.00
SO		0.179589	0.343982	0.6157831	0.8178208	0.9758246	1.00
ME		fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range

5.1.2 MR2

La macro regione MR2=Eastern Alps è raffigurata in Figura 6 con il colore verde scuro e raggruppa le aree sismogenetiche: SA2, SA7, SA48, SA60, SA61, SA62, SA64, SA65, SA66, SA67 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 8 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 8

MR2_ tempi di intercorrenza in anni							
0.359444	3.290192	16.42364	44.36438	57.36636	60.67586	63.30458	88.23068
119.7216	125.9131	141.2944					
$\mu = 65.540373$ $p = 0.3636$ $\lambda_{\infty} = 0.028466$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 1.8657$							
MR2_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.005484	0.050201	0.250588	0.676902	0.875283	0.925778	0.965887	1.346204
1.826684	1.921153	2.155836					

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=6$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 2.7 ottenendo un numero ottimo di momenti = 1.

I valori di $\hat{\lambda}$ stimati con i diversi metodi ci inducono a scartare l'ipotesi poissoniana. Il valore $r = 4.8$ fa ritenere abbastanza attendibile anche la stima di soglia.

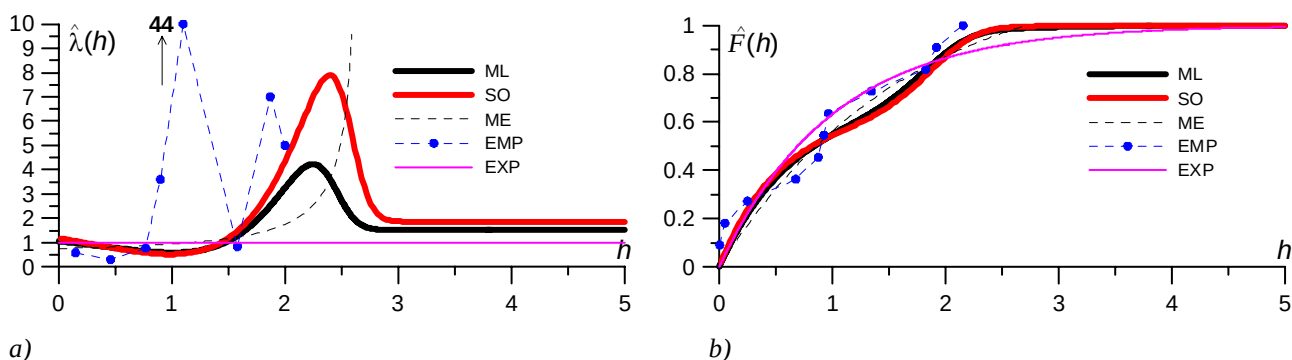


Fig. 9

In Tabella 9 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.9 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR2		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA02	t0=200						
ML		0.114447	0.215815	0.375595	0.502973	0.689655	0.9022
SO		0.114461	0.215896	0.3851	0.502927	0.78673	0.903689
ME		fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range
SA07	t0=66						
ML		0.158078	0.269989	0.43255	0.541493	0.70936	0.909814
SO		0.321277	0.495745	0.659574	0.739362	0.845745	0.96383
ME		0.21459	0.350154	0.723573	0.947063	fuori range	fuori range
SA48	t0=101						
ML		0.097604	0.189295	0.412469	0.614987	0.881123	0.97791
SO		0.088018	0.185602	0.402292	0.595472	0.894155	0.993447
ME		0.095892	0.156473	0.323342	0.423213	0.63837	fuori range
SA61	t0=66						
ML		0.046522	0.086649	0.188084	0.283234	0.53926	0.966194
SO		0.03828	0.076316	0.158063	0.243755	0.494248	0.983021
ME		0.082384	0.13443	0.277791	0.363595	0.54844	0.878493
SA62	t0=226						
ML		0.128002	0.203876	0.385098	0.503002	0.685044	0.902293
SO		0.144231	0.259615	0.451923	0.576923	0.759615	0.942308
ME		fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range
SA64	t0=25						
ML		0.064062	0.11414	0.210998	0.28877	0.398698	0.776872
SO		0.064237	0.10656	0.209174	0.277682	0.365149	0.742312
ME		0.073819	0.120454	0.228635	0.344005	0.506115	0.787165
SA66	t0=26						
ML		0.077873	0.112654	0.208371	0.285504	0.395937	0.785124
SO		0.077312	0.104475	0.195526	0.272838	0.367076	0.751409
ME		0.085219	0.123454	0.231635	0.348005	0.509115	0.790165
SA67	t0=74						
ML		0.049144	0.086881	0.20383	0.326123	0.618982	0.970412
SO		0.040839	0.084217	0.183693	0.212682	0.590012	0.98808
ME		0.084818	0.138399	0.285992	0.308792	0.56463	0.904426

5.1.3 MR3

La macro regione MR3= Central Northern Apennines è raffigurata in Figura 6 con il colore verde chiaro e raggruppa le aree sismogenetiche: SA01, SA08, SA09, SA10, SA11, SA12, SA18, SA20, SA27, SA30, SA31, SA32, SA39, SA43, SA44, SA45, SA46, SA47, SA49, SA50, SA51, SA54 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 10 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 10

MR3_ tempi di intercorrenza in anni							
0.247982	0.286035	0.501886	0.515518	3.714619	6.824474	12.61874	13.72396
18.150685	19.08252	21.23771	24.29092	25.32855	26.28320	27.48978	28.17743
29.07295	32.18060	34.87820	40.30768	45.14968	51.01707	57.10596	61.22063
69.90959	88.22727	92.85134	112.2265	114.6950	139.3373	226.8711	343.7824
$\mu=55.22835$ $p=0.3125$ $\lambda_{\infty}=0.047715$ $\tilde{\lambda}_{\infty}=2.6352$							
MR3_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.004490	0.005179	0.009087	0.009334	0.067259	0.123568	0.228483	0.248495
0.328648	0.345520	0.384544	0.439827	0.458615	0.475900	0.497748	0.510199
0.526414	0.582683	0.631527	0.729837	0.817509	0.923748	1.033997	1.108500
1.265828	1.597500	1.681226	2.032045	2.076741	2.522931	4.107873	6.224745

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=4$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 6.5 ottenendo un numero ottimo di momenti = 2.

La MR3 nonostante sia la più ricca di eventi, è senz'altro la più problematica da interpretare.

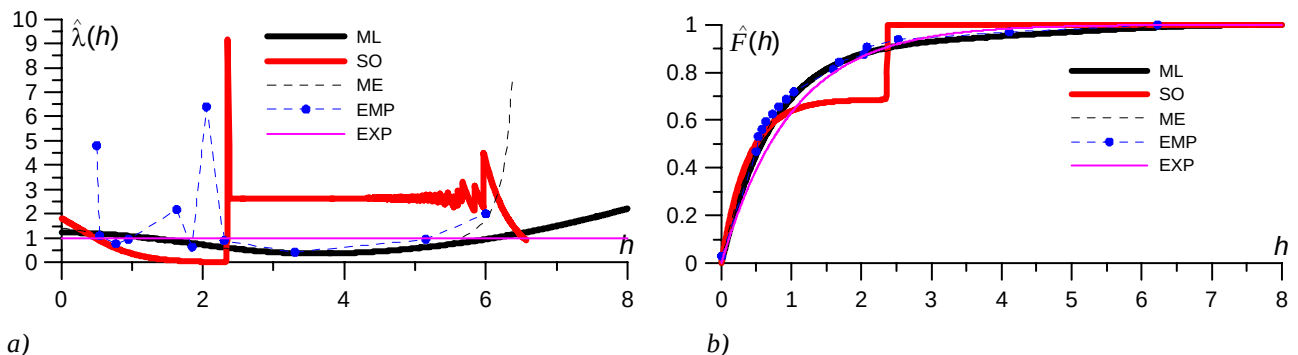
Può essere che in effetti comportamenti diversi convivano nella MR, e per questo motivo essi conducano a stime diverse. Qualitativamente le diverse stime si possono commentare come segue.

Il metodo EMP non può non sentire punti salienti di pericolosità quando più intertempi sono raggruppati.

Il metodo SO, propenso per così dire a cogliere la presenza del terremoto caratteristico, lo indica in modo esasperato attorno al doppio del periodo di ritorno.

Il metodo ML più tranquillamente non si discosta molto dall'ipotesi poissoniana.

In effetti i valori di $\hat{\lambda}$ stimati dai vari metodi solo nei punti critici citati si discostano in modo deciso dal valore poissoniano. Tuttavia di una situazione di maggiore allarme attorno al valore $h=2$, e di un'attenzione agli eventuali diversi comportamenti nelle singole aree, occorrerà tener conto in sede decisionale. Inoltre il valore $r \approx 7.7$ fa ritenere degna di interesse anche la stima di soglia.



a)
Fig. 10

In Tabella 11 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.11 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR3		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA01	$t_0=39$						
ML		0.097136	0.155752	0.334919	0.441766	0.606052	0.790995
SO		0.060704	0.09108	0.170151	0.224741	0.325826	0.690268
ME		0.101924	0.101924	0.164919	0.307479	0.412297	0.564775
SA08	$t_0=85$						
ML		0.068794	0.145291	0.260374	0.351829	0.489361	0.657236
SO		0.033601	0.068969	0.166828	0.267182	0.492241	0.925766
ME		0.059416	0.12626	0.228966	0.313581	0.446366	0.640212
SA09	$t_0=31$						
ML		0.10992	0.18795	0.336037	0.452739	0.617338	0.809933
SO		0.078931	0.129461	0.214149	0.273656	0.369558	0.663746
ME		0.108195	0.18366	0.324212	0.432985	0.585567	0.776203
SA11	$t_0=314$						
ML		0.0807	0.143167	0.269105	0.397791	0.608181	0.901755
SO		Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato
ME		0.108338	0.197557	0.394052	0.629315	fuori range	fuori range
SA12	$t_0=35$						
ML		0.108889	0.186193	0.332904	0.442808	0.61168	0.803073
SO		0.071571	0.117655	0.196069	0.253169	0.352314	0.671131
ME		0.105843	0.179818	0.317926	0.419943	0.576562	0.767946
SA18	$t_0=174$						
ML		0.038135	0.066846	0.123666	0.182167	0.2903	0.531044
SO		0.244295	0.444243	0.679979	0.84388	0.9764	1
ME		0.043343	0.076289	0.141507	0.207804	0.325277	0.558601
SA20	$t_0=59$						
ML		0.096164	0.169474	0.309698	0.403487	0.561684	0.740425
SO		0.065783	0.030664	0.125568	0.187595	0.345312	0.792662
Exp _g		0.151949	0.151949	0.277931	0.363193	0.512205	0.704592
SA27	$t_0=4$						
ML		0.105332	0.198818	0.363088	0.478811	0.656339	0.852444
SO		0.14839	0.241956	0.392762	0.487295	0.591478	0.723327
ME		0.115908	0.215478	0.382951	0.49534	0.659692	0.837468
SA30	$t_0=86$						
ML		0.076278	0.144136	0.258339	0.349129	0.482961	0.654875
SO		0.034266	0.079779	0.170561	0.272975	0.51385	0.934332
ME		0.065894	0.125216	0.227317	0.311422	0.44375	0.639332
SA31	$t_0=30$						
ML		0.110247	0.188512	0.329682	0.454086	0.626229	0.811018
SO		0.081529	0.1336	0.220552	0.281018	0.376094	0.654307
ME		0.108956	0.184954	0.31937	0.435564	0.595158	0.777673
SA32	$t_0=72$						
ML		0.066097	0.158425	0.289704	0.38262	0.526976	0.701678
SO		0.028749	0.064834	0.133591	0.211139	0.408489	0.864575
ME		0.05778	0.13883	0.255654	0.340407	0.478975	0.672883
SA39	$t_0=127$						
ML		0.058057	0.099848	0.185191	0.248238	0.35562	0.540899
SO		0.107143	0.193066	0.381088	0.55247	0.820965	0.995826
ME		0.054645	0.095011	0.180328	0.246254	0.364446	0.568923

SA44	t0=216						
ML		0.037089	0.066417	0.128039	0.196347	0.332166	0.635779
SO		0.417526	0.628866	0.860825	0.963918	1	1
ME		0.041511	0.073485	0.139304	0.209611	0.34368	0.663052
SA46	t0=184						
ML		0.036477	0.060891	0.120398	0.179568	0.292278	0.551265
SO		0.285114	0.465236	0.742417	0.888941	1	1
ME		0.042245	0.070604	0.138722	0.204941	0.324222	0.573454
SA47	t0=73						
ML		0.083336	0.15739	0.287834	0.380181	0.526787	0.696951
SO		0.032685	0.065433	0.135485	0.214743	0.415692	0.877162
ME		0.072746	0.137734	0.25379	0.338106	0.479253	0.670184
SA49	t0=6						
ML		0.10497	0.198134	0.354213	0.477168	0.657778	0.850691
SO		0.117069	0.232688	0.377818	0.46904	0.731742	0.708144
ME		0.114446	0.212894	0.371241	0.490386	0.657513	0.832779
SA51	t0=93						
ML		0.080047	0.137052	0.251217	0.328324	0.461556	0.633179
SO		0.049414	0.102624	0.19574	0.324121	0.966505	0.951065
ME		0.069352	0.119479	0.222445	0.294863	0.428614	0.625052

5.1.4 MR4

La macro regione MR4= Central Northern Apennines è raffigurata in Figura 6 con il colore giallo chiaro e raggruppa le aree sismogenetiche: SA13, SA25, SA26, SA28, SA37, SA40, SA41, SA56 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 12 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 12

MR4_ tempi di intercorrenza in anni							
0.051265	1.403851	1.841407	2.175973	3.153834	4.277055	4.631491	5.863488
6.118125	6.824168	10.87455	10.88431	12.26855	13.88837	15.13162	16.39599
22.08228	22.26318	22.32155	24.58904	24.67123	29.21877	31.78788	40.20788
41.59272	42.28641	43.96712	46.34520	60.64055	77.54435	122.9986	159.6148
$\mu = 28.99736 \quad p = 0.3438 \quad \lambda_{\infty} = 0.090629 \quad \tilde{\lambda}_{\infty} = 2.6280$							
MR4_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.001768	0.048413	0.063503	0.075040	0.108763	0.147498	0.159721	0.202208
0.210989	0.235338	0.375017	0.375355	0.423092	0.478953	0.521827	0.565431
0.761527	0.767766	0.769779	0.847975	0.850810	1.007636	1.096234	1.386605
1.434362	1.458285	1.516246	1.598256	2.091244	2.674186	4.241717	5.504459

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=2$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 5.5 ottenendo un numero ottimo di momenti = 2.

I valori di $\hat{\lambda}$ stimati con i modelli matematici non sono maggiori di 3, e ciò non fornisce forti suggerimenti se scartare o no l'ipotesi poissoniana. Ma anche in questo caso, come nel caso precedente, la presenza di tempi di intercorrenza raggruppati (in questo caso attorno ai valori 1.4, 2.3) sono evidenziati dal metodo EMP (Fig. 11a); esso evidenzia un andamento multimodale, non colto dai modelli matematici, con punti salienti di pericolosità di cui occorrerà tener conto. La scelta di utilizzare la mistura ex-w con $\alpha=2$, pur sembrando penalizzante nell'interpretazione dei dati raggruppati, è la scelta ottimale (sempre nell'ambito delle ipotesi vagliate) avallata, oltre che dalle predisposte analisi di credibilità, sia dal valore della funzione di verosimiglianza, sia dai test di significatività classici. Il valore $r \approx 5.8$ fa ritenere degna di attenzione la stima di SO e quindi la previsione al di là di $h=4$ meno ottimistica di quella poissoniana.

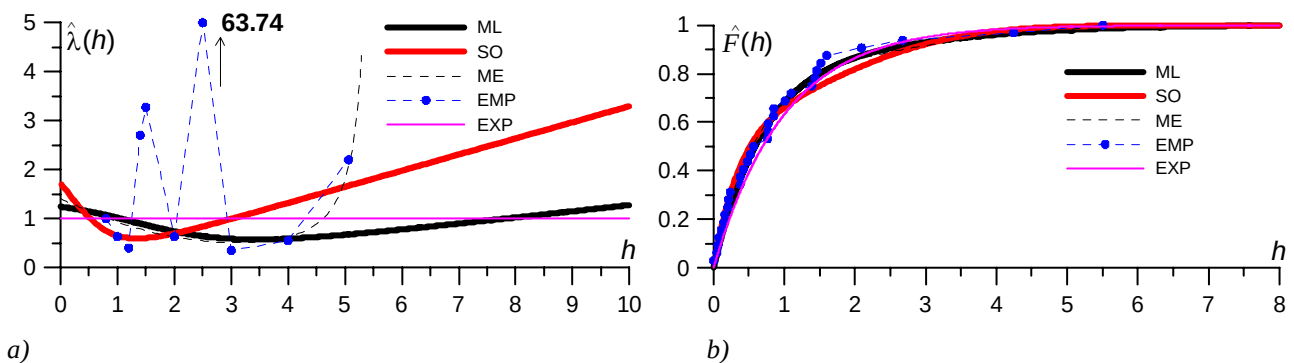


Fig. 11

In Tabella 13 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.13 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR4		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA25	$t_0=18$						
ML		0.161054	0.30586	0.502362	0.634005	0.780491	0.921256
SO		0.123765	0.228959	0.375726	0.485153	0.687985	0.949652
ME		0.164582	0.293156	0.48037	0.598669	0.740055	0.898372
SA26	$t_0=82$						
ML		0.096065	0.181464	0.330998	0.447294	0.637769	0.895739
SO		0.142704	0.265269	0.509026	0.674833	0.876424	0.994197
ME		0.083795	0.1601	0.299794	0.417345	0.648214	fuori range
SA28	$t_0=5$						
ML		0.174731	0.330941	0.550055	0.674371	0.822008	0.939842
SO		0.196914	0.345369	0.517931	0.608422	0.745664	0.947441
ME		0.185425	0.343338	0.553228	0.667558	0.803032	0.923146
SA37	$t_0=83$						
ML		0.095742	0.185693	0.330517	0.447042	0.638091	0.894702
SO		0.161459	0.318902	0.513278	0.679089	0.879156	0.994421
ME		0.083563	0.16426	0.300187	0.418587	0.652739	fuori range
SA40	$t_0=240$						
ML		0.166269	0.30708	0.53222	0.68576	0.865553	0.988067
SO		Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato	Indeterminato
ME		fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range	fuori range
SA41	$t_0=1$						
ML		0.187709	0.336656	0.554107	0.687639	0.831979	0.94504
SO		0.223093	0.402558	0.571086	0.658236	0.777032	0.950495
ME		0.204466	0.357768	0.567935	0.690089	0.819918	0.93129
SA56	$t_0=18$						
ML		0.161054	0.30586	0.502362	0.634005	0.780491	0.921256
SO		0.123765	0.228959	0.375726	0.485153	0.687985	0.949652
ME		0.164582	0.293156	0.48037	0.598669	0.740055	0.898372

5.1.5 MR5

La macro regione MR5=Southern Apennines è raffigurata in Figura 6 con il colore giallo ocra e raggruppa le aree sismogenetiche: SA03, SA04, SA05, SA58, SA59, SA75, SA77, SA79, SA84, SA89 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 14 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 14

MR5_ tempi di intercorrenza in anni							
3.6736149	14.00548	34.78904	55.02297	61.19725	143.7406	194.7283	226.8948
314.05750							
$\mu = 116.45661$ $p = 0.4444$ $\lambda_{\infty} = 0.0296402$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 3.4518$							
MR5_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.0315449	0.120263	0.298730	0.472476	0.525494	1.234284	1.672110	1.948321
2.6967770							

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=4$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 3.0 ottenendo un numero ottimo di momenti = 1.

Il valore $r \approx 6.5$ fa ritenere attendibile la stima di soglia.

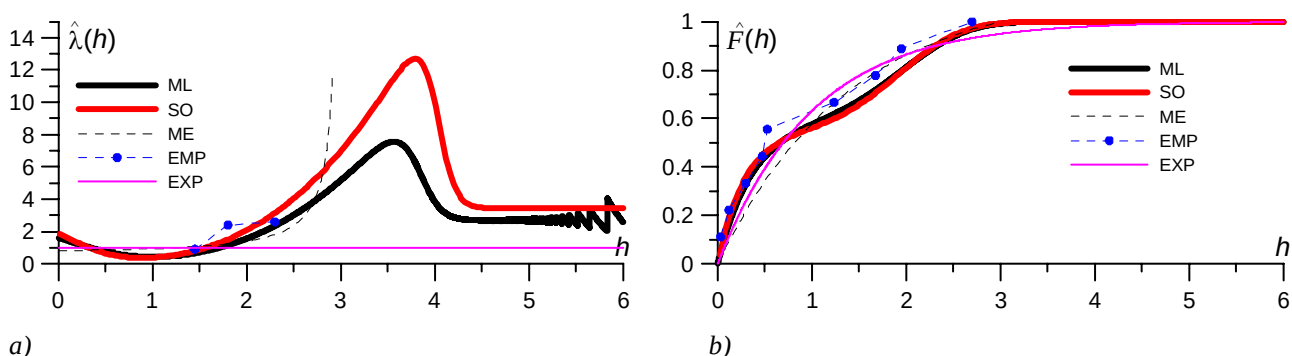


Fig. 12

In Tabella 15 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.15 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR5		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA03	$t_0=0.0$						
ML		0.060341	0.114519	0.226996	0.297595	0.395845	0.543678
SO		0.069412	0.206314	0.303349	0.383509	0.459184	0.592876
ME		0.032007	0.06311	0.137078	0.192546	0.302233	0.521141
SA04	$t_0=271$						
ML		0.095712	0.208365	0.371348	0.528115	0.758347	0.971487
SO		0.103329	0.24665	0.415201	0.557475	0.786432	0.979585
ME		0.07417	0.163838	0.300861	0.445756	0.709225	fuori range
SA05	$t_0=12$						
ML		0.054256	0.114364	0.195249	0.267839	0.34611	0.49762
SO		0.060546	0.113299	0.199351	0.278587	0.349103	0.468856
ME		0.032292	0.071381	0.131072	0.194267	0.303072	0.525802
SA58	$t_0=54$						
ML		0.031337	0.066361	0.114362	0.159076	0.20586	0.365483
SO		0.027057	0.050918	0.090885	0.13024	0.16475	0.310484
ME		0.033714	0.074523	0.136835	0.202811	0.306398	0.548922
SA59	$t_0=121$						
ML		0.017272	0.034532	0.074004	0.115383	0.201969	0.477297
SO		0.014296	0.029031	0.068548	0.103677	0.196822	0.484641
ME		0.037444	0.073828	0.151998	0.225259	0.351431	0.609669
SA75	$t_0=52$						
ML		0.031873	0.060701	0.116209	0.161503	0.228802	0.367283
SO		0.028412	0.053444	0.104218	0.135955	0.191275	0.313431
ME		0.03366	0.066375	0.136645	0.202526	0.315961	0.548164
SA79	$t_0=69$						
ML		0.025185	0.059011	0.093582	0.13225	0.194937	0.354401
SO		0.024778	0.058107	0.092249	0.130573	0.193151	0.354511
ME		0.034355	0.084092	0.13947	0.20672	0.322494	0.559486
SA84	$t_0=72$						
ML		0.023999	0.046021	0.089703	0.127398	0.18985	0.355141
SO		0.018604	0.03543	0.071808	0.097186	0.150983	0.313202
ME		0.034526	0.068076	0.140142	0.207696	0.324019	0.562134
SA89	$t_0=151$						
ML		0.021787	0.050044	0.09788	0.155801	0.276753	0.61443
SO		0.021129	0.043366	0.103919	0.157489	0.292896	0.639001
ME		0.040117	0.089627	0.162857	0.24134	0.376528	0.653209

5.1.6 MR6

La macro regione MR6=Southern Apennines è raffigurata in Figura 6 con il colore rosso e raggruppa le aree sismogenetiche: SA24, SA33, SA34, SA38, SA57, SA63, SA87 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 16 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 16

MR6_ tempi di intercorrenza in anni							
4.688642	5.881749	13.76984	27.18319	30.71288	56.73634	72.65607	100.3346
122.9360	122.937	161.8029	215.7441				
$\mu = 77.94861$ $p = 0.4167$ $\lambda_{\infty} = 0.033077$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 2.5783$							
MR6_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.060150	0.075457	0.176653	0.348732	0.394014	0.727869	0.932102	1.287189
1.577142	1.577154	2.075764	2.767774				

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=4$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 3.0 ottenendo un numero ottimo di momenti = 1.

Tutti i metodi concordano nel dare piccole diversità dall'ipotesi poissoniana fin quasi al doppio del periodo di ritorno (Fig. 13a). Il valore $r = 4.8$ fa ritenere abbastanza attendibile la stima di soglia e qui, come in altri casi, il metodo soglia addita un più consistente pericolo di terremoto caratteristico.

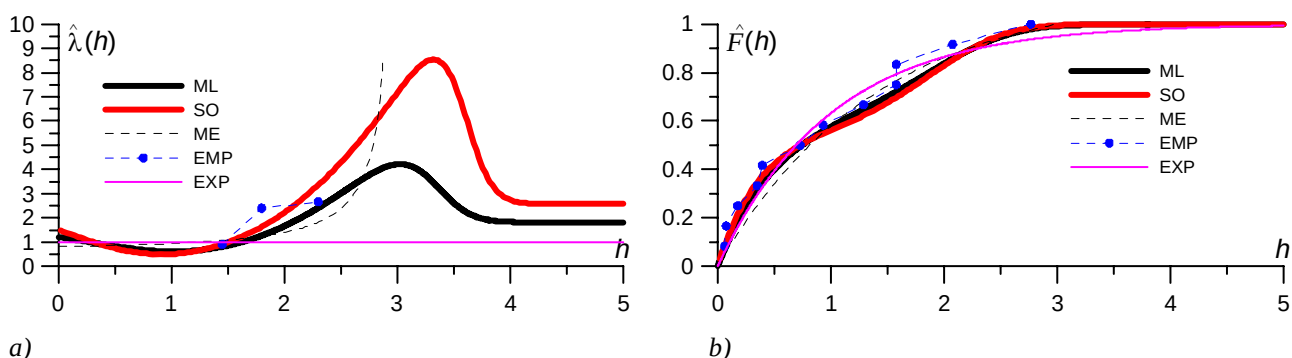


Fig. 13

In Tabella 17 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni) il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.17 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR6		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA24	$t_0=40$						
ML		0.039451	0.096306	0.175295	0.237261	0.351327	0.627267
SO		0.04145	0.088838	0.147305	0.195926	0.281847	0.580433
ME		0.042291	0.106876	0.204251	0.286431	0.44201	0.721479
SA34	$t_0=22$						
ML		0.056713	0.107703	0.207961	0.277258	0.392574	0.612508
SO		0.058281	0.108403	0.200431	0.259055	0.350627	0.559674
ME		0.049064	0.096063	0.198182	0.277916	0.428859	0.700014
SA38	$t_0=4$						
ML		0.06687	0.136225	0.243931	0.323475	0.445231	0.636549
SO		0.080004	0.148542	0.272828	0.349374	0.456243	0.607427
ME		0.047855	0.101151	0.193301	0.271068	0.413136	0.682776
SA63	$t_0=92$						
ML		0.038474	0.083398	0.16832	0.249702	0.435952	0.845912
SO		0.032162	0.078694	0.150611	0.231663	0.429369	0.867464
ME		0.057749	0.122077	0.233283	0.327149	0.504588	0.823986

5.1.7 MR7

La macro regione MR7=Calabrian Arc è raffigurata in Figura 6 con il colore magenta e raggruppa le aree sismogenetiche: SA15, SA16, SA19, SA53, SA55, SA68, SA80 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 18 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 18

MR7_ tempi di intercorrenza in anni							
0.005613	0.075942	0.507056	1.745634	4.129079	7.242543	8.678101	12.93454
14.55944	15.41725	16.64099	18.33644	25.56771	28.68665	38.34579	39.16575
41.67178	51.84873	54.01703	65.54449	68.24903	81.13173	84.08513	84.10157
125.8909	129.2970	136.4006	156.9056	186.5086			
$\mu = 51.64451$ $p = 0.4138$ $\lambda_{\infty} = 0.062109$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 3.2076$							
MR7_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.000109	0.001470	0.009818	0.033801	0.079952	0.140238	0.168035	0.250453
0.281916	0.298526	0.322221	0.355050	0.495070	0.555463	0.742493	0.758370
0.806895	1.003952	1.045937	1.269145	1.321513	1.570962	1.628149	1.628467
2.437638	2.503591	2.641139	3.038179	3.611386			

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=4$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 4.0 ottenendo un numero ottimo di momenti = 1.

I valori di $\hat{\lambda}$ stimati con i diversi metodi ci inducono, ancora una volta, a scartare l'ipotesi poissoniana (Fig. 14a). Il valore $r=6.3$ fa ritenere abbastanza attendibile la stima di soglia, più pessimista di quella di massima verosimiglianza. Il metodo EMP mostra un clamoroso punto saliente attorno a una volta e mezzo il periodo di ritorno di cui occorrerà tenere conto.

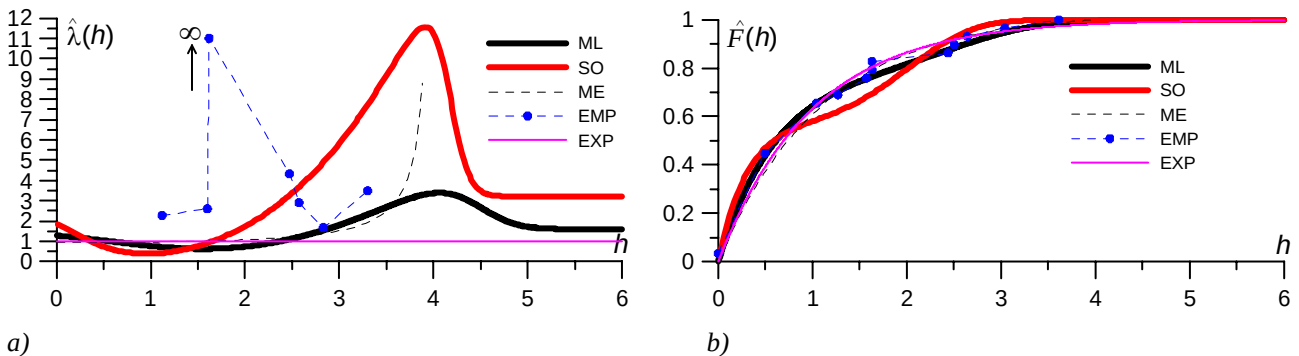


Fig. 14

In Tabella 19 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.19 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR7		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA15	$t_0=89$						
ML		0.062719	0.117985	0.239156	0.353902	0.583767	0.946568
SO		0.095297	0.175153	0.380517	0.576199	0.851242	0.99947
ME		0.098628	0.180138	0.339336	0.466234	0.667783	0.947126
SA16	$t_0=27$						
ML		0.094701	0.168263	0.299976	0.394544	0.53231	0.777253
SO		0.06061	0.098543	0.169038	0.225689	0.358858	0.843734
ME		0.089869	0.164127	0.309138	0.424744	0.608344	0.862843
SA19	$t_0=19$						
ML		0.102141	0.181303	0.322229	0.422	0.564376	0.779014
SO		0.082041	0.13195	0.217741	0.274793	0.376999	0.804316
ME		0.08934	0.16317	0.30736	0.422307	0.608728	0.857882
SA53	$t_0=74$						
ML		0.06064	0.117368	0.213178	0.315075	0.511384	0.902229
SO		0.05872	0.123895	0.271931	0.41866	0.715728	0.995848
ME		0.095403	0.182574	0.321133	0.450913	0.645817	0.91599
SA55	$t_0=95$						
ML		0.137188	0.207059	0.435638	0.638186	0.891599	0.99976
SO		0.137188	0.207059	0.435638	0.638186	0.891599	0.99999
ME		0.119388	0.174367	0.345175	0.47423	0.679201	0.96367
SA68	$t_0=1$						
ML		0.106398	0.208072	0.361972	0.481129	0.630591	0.80337
SO		0.250298	0.270214	0.40242	0.484241	0.564588	0.7697
ME		0.079909	0.161435	0.297547	0.41781	0.598406	0.845481
SA80	$t_0=174$						
ML		0.223999	0.391998	0.653394	0.818779	0.950111	0.99312
SO		0.5	0.726027	0.958904	0.993151	1	1
ME		0.198792	0.363214	0.69856	0.939619	fuori range	fuori range

5.1.8 MR8

La macro regione MR8=Sicily è raffigurata in Figura 6 con il colore viola e raggruppa le aree sismogenetiche: SA06, SA14, SA17, SA21, SA29, SA35, SA36, SA42 (numerazione di Figura 7).

In Tabella 20 sono riportati i tempi di intercorrenza della macro regione sia in anni sia in forma adimensionalizzata; in tabella è riportata anche il periodo di ritorno medio, μ , in anni.

Tab. 20

MR8_ tempi di intercorrenza in anni							
0.471917	2.732234	9.954695	22.27298	39.89495	47.83341	51.66277	68.88320
69.03186	83.81932	96.21093	113.0211	125.1101	140.4369	193.4059	
$\mu = 70.98282$ $p = 0.400$ $\lambda_{\infty} = 0.028777$ $\tilde{\lambda}_{\infty} = 2.0427$							
MR8_ tempi di intercorrenza adimensionalizzati							
0.006648	0.038491	0.140241	0.313780	0.562037	0.673873	0.727821	0.970421
0.972515	1.180839	1.355411	1.592232	1.762541	1.978464	2.724686	

La stima dei parametri per il metodo ML è stata condotta assumendo $\alpha=4$, nel metodo SO la soglia è stata assunta uguale a 1, mentre nel metodo ME la distribuzione è stata troncata a 3.0 ottenendo un numero di momenti ottimi = 1.

I valori di $\hat{\lambda}$ stimati con i diversi metodi ci inducono a scartare l'ipotesi poissoniana (Fig. 15a). Il valore SO $r = 6.3$ fa ritenere attendibile la stima di soglia, cui dare credito per $h > 2$. Anche del punto saliente fornito dal metodo EMP attorno al periodo di ritorno occorrerà tener conto.

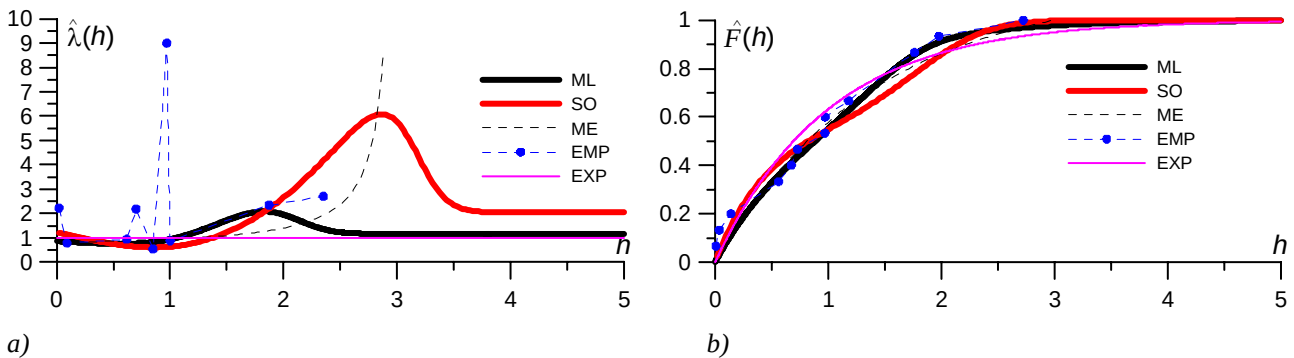


Fig. 15

In Tabella 21 sono riportate le probabilità $\hat{P}_{\Delta t|t_0}$ per diversi Δt (5anni, 10 anni, 20, anni, 30anni, 50anni, 100anni); il valore t_0 riportato per ogni SA è calcolato a partire dall'ultimo accadimento fino al 2002.

Tab.21 Previsione in termini di probabilità per diversi valori di t_0 e di Δt espressi in anni

MR8		5anni	10anni	20anni	30anni	50anni	100anni
SA14	$t_0=0.0$						
ML		0.065625	0.118268	0.205584	0.286884	0.422351	0.727319
SO		0.068977	0.144806	0.241345	0.33898	0.454495	0.663497
ME		0.058686	0.115343	0.205756	0.294148	0.446441	0.719792
SA17	$t_0=88$						
ML		0.087958	0.175244	0.34338	0.494549	0.715496	0.902061
SO		0.058539	0.104239	0.200548	0.357906	0.584102	0.961275
ME		0.068271	0.133185	0.253634	0.362604	0.550334	0.887284
SA21	$t_0=34$						
ML		0.043959	0.106281	0.197182	0.254345	0.453463	0.839808
SO		0.043056	0.093954	0.169548	0.245305	0.352983	0.720654
ME		0.050356	0.12193	0.224505	0.310961	0.471959	0.760941
SA35	$t_0=184$						
ML		0.090198	0.151977	0.279681	0.387946	0.558072	0.80648
SO		0.303762	0.477009	0.712959	0.872271	0.942378	0.992104
ME		0.218819	0.375055	0.714159	fuori range	fuori range	fuori range
SA42	$t_0=24$						
ML		0.044983	0.107756	0.196574	0.272604	0.429294	0.807424
SO		0.069899	0.118394	0.2004	0.25935	0.377512	0.682628
ME		0.049424	0.119688	0.220363	0.30523	0.46326	0.746909

5.2 Commento ai risultati ottenuti

Qui di seguito nelle Figure 18-35 sono riassunti in forma grafica le probabilità riportate nelle tabelle precedenti.

Le probabilità di accadimento risentono della numerosità campionaria della SA: le probabilità rilevate per una SA con un solo accadimento magnitudo Maw maggiore di 5.3 è sicuramente da assumersi con le dovute cautele. In Figura 16 sono riportate tali aree, invece in Figura 17 sono riportate le aree che presentano un tempo t_0 maggiore del tempo di intercorrenza medio μ registrato per la macro regione di appartenenza ($t_0 > \mu$) distinte da quelle che presentano t_0 doppio del valore medio registrato ($t_0 > 2\mu$).

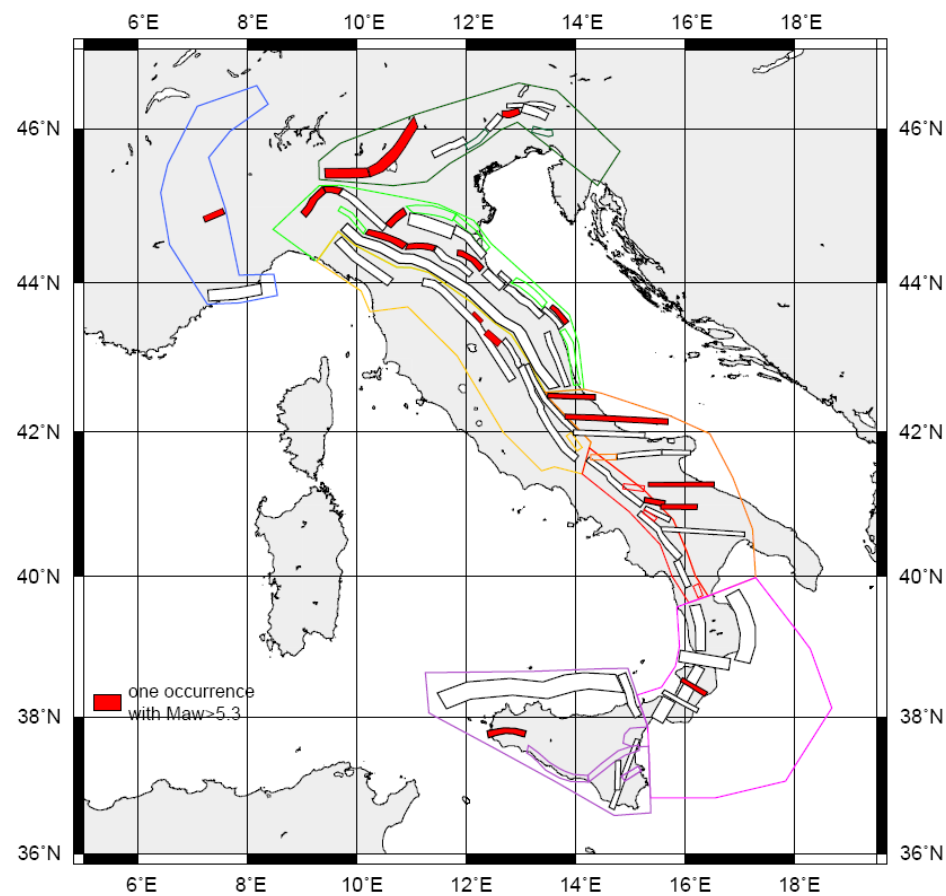


Fig 16 Aree sismogenetiche SA con una sola occorrenza di magnitudo $M_{aw} > 5.3$

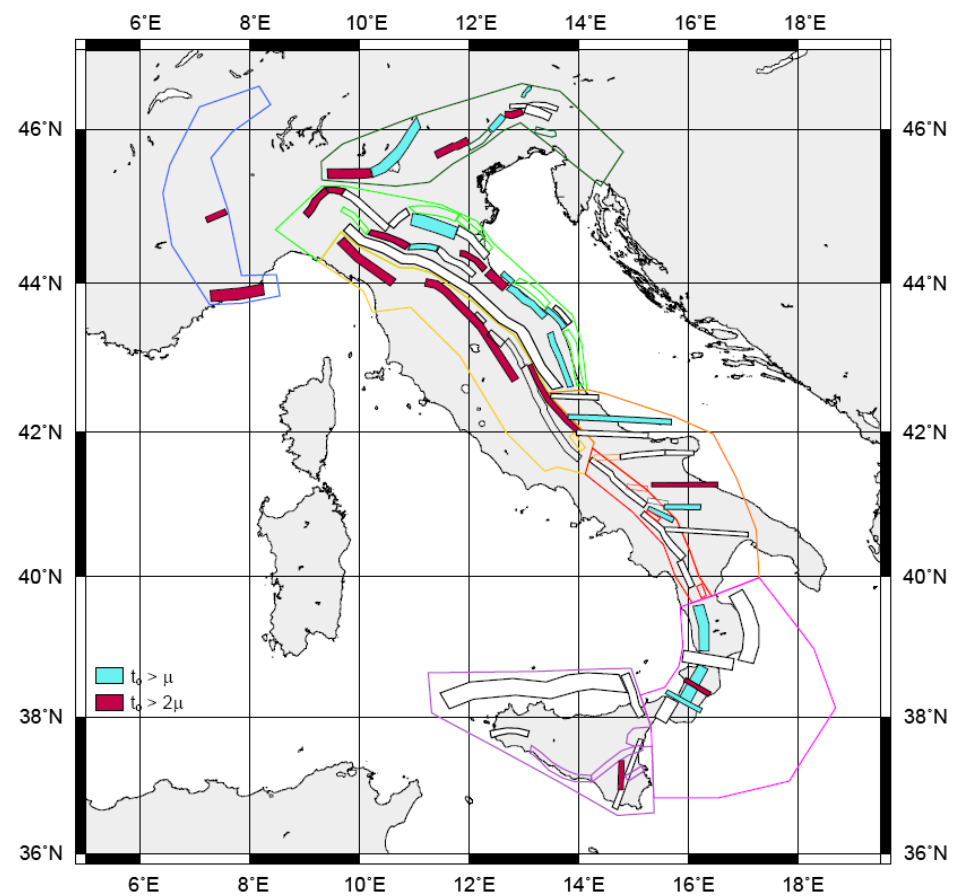


Fig 17 SA con t_0 maggiore della media μ dei tempi di intercorrenza della MR di appartenenza.

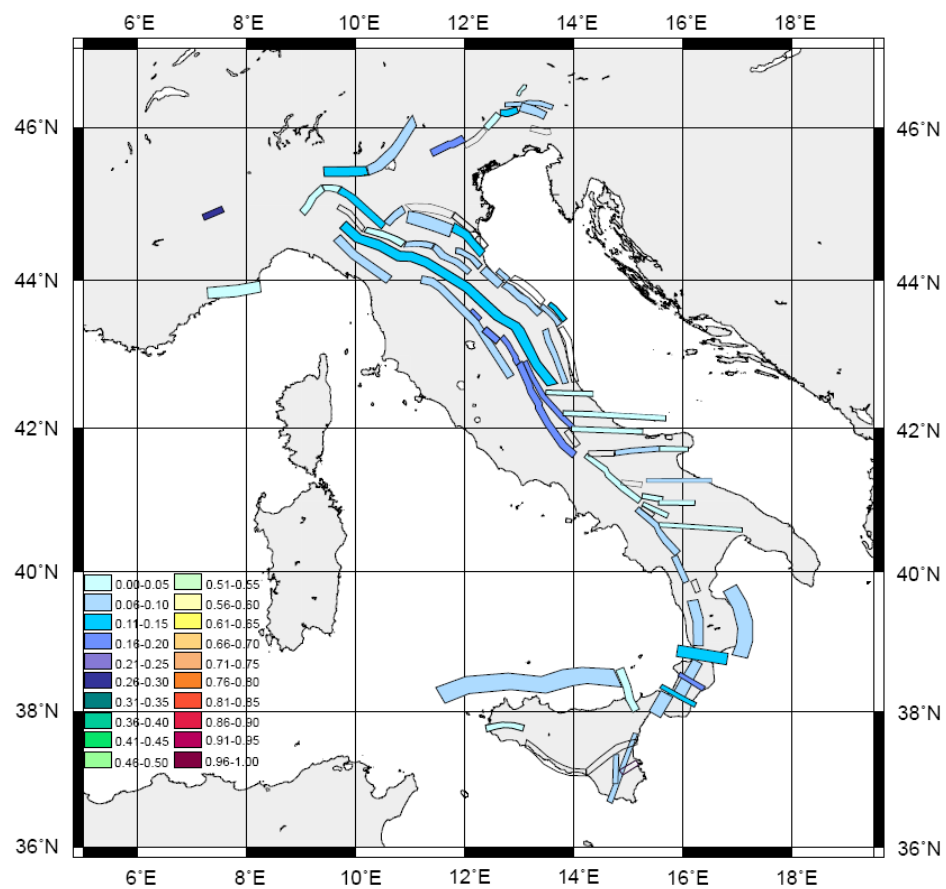


Fig 18 $\Delta t=5$ anni, Metodo ML

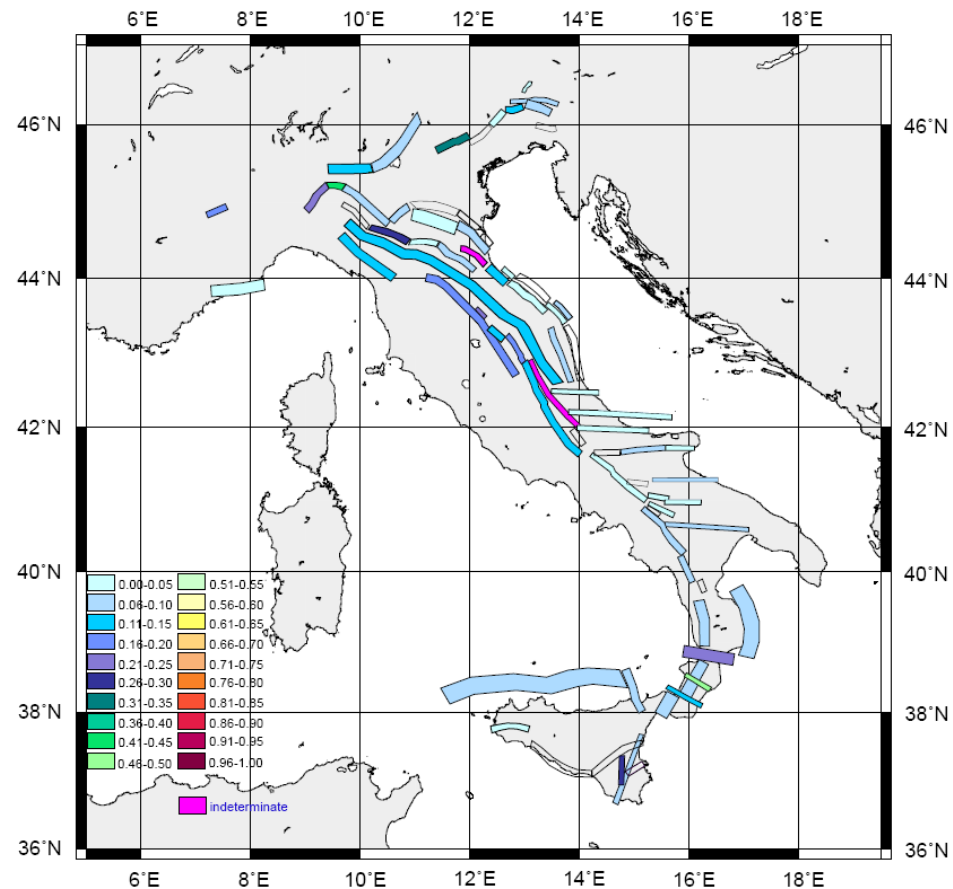


Fig 19 $\Delta t=5$ anni, Metodo SO

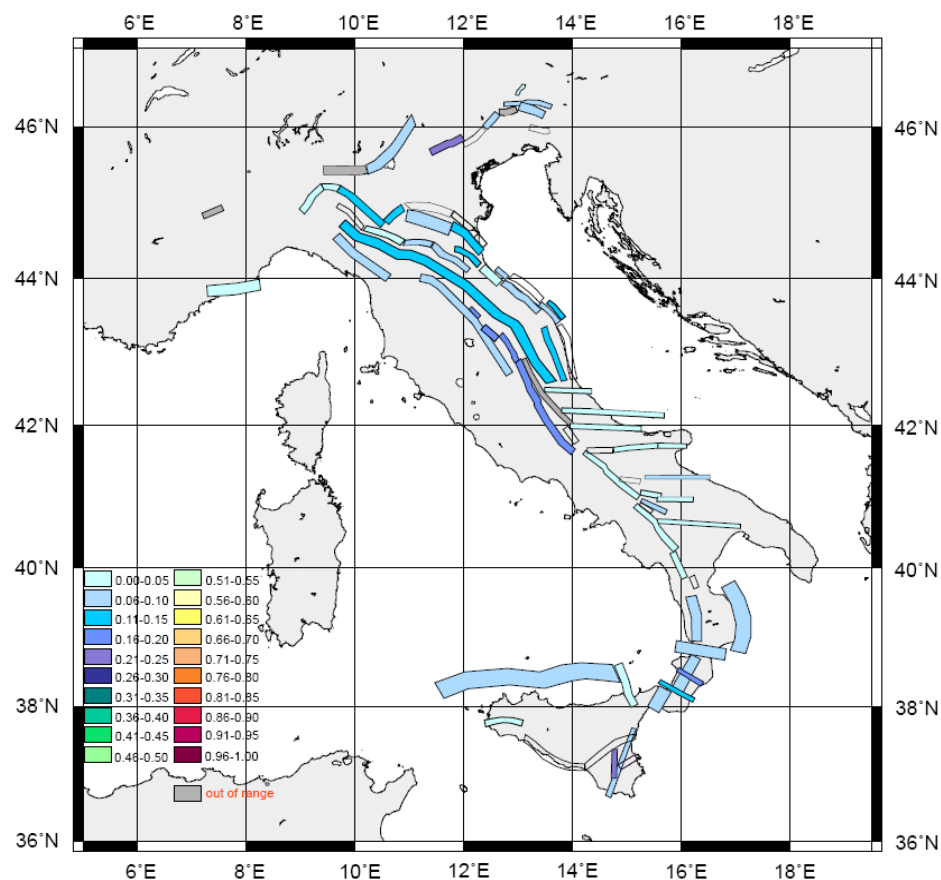


Fig 20 $\Delta t=5$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 18, 19 e 20 emerge che per $\Delta t=5$ anni i metodi ML ed ME risultano essere meno severi rispetto al metodo SO. Le aree più a rischio sembrano essere le aree dell'Appennino centro settentrionale e le aree di trascorrenza dell'Arco Calabro SA55, 68 80.

Alcune aree del Nord mostrano anch'esse una probabilità accentuata, bisogna, però, sottolineare che sono aree con $t_0 > 2\mu$ pertanto con un tempo di quiescenza elevato rispetto alla media delle intercorrenze della macro regione e a volte con la presenza di un unico evento di magnitudo maggiore di 5.3 (Fig. 17 e Fig. 18).

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=5$ anni sono comprese tra:

- ML 0.00 – 0.30
- SO 0.00 – 0.45
Situazione critica di 1.00 in SA11 e SA40
- ME 0.00 – 0.25
Risentono della troncatura SA02, SA11, SA23, SA62

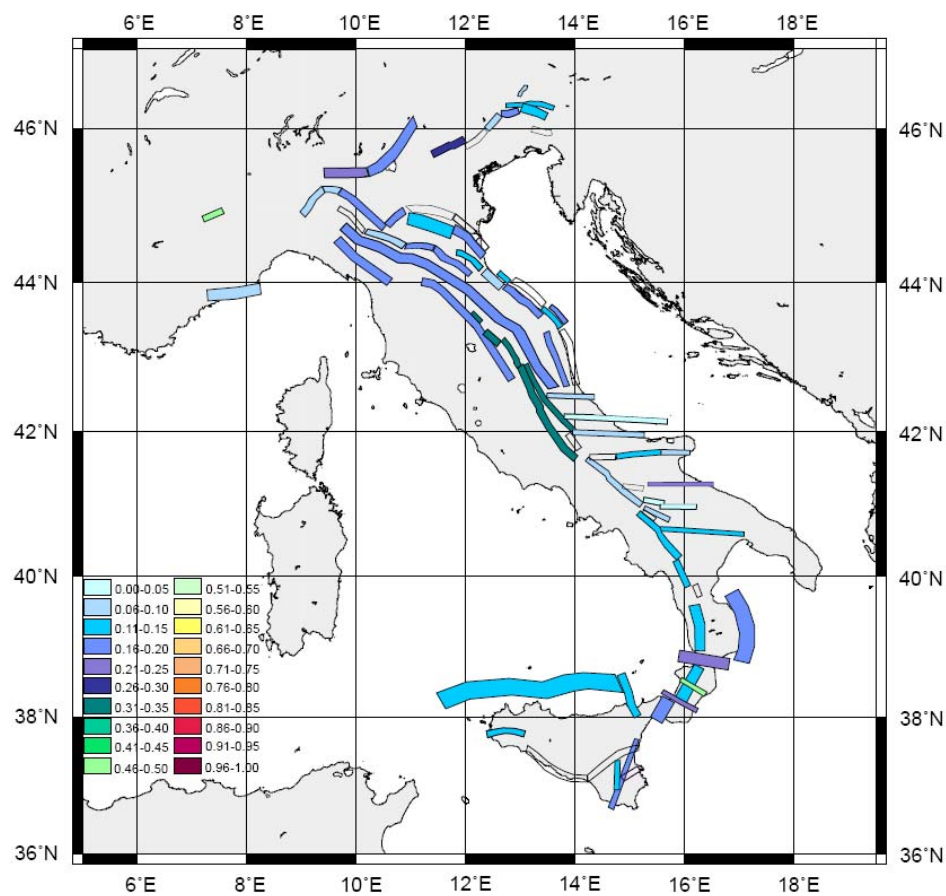


Fig 21 $\Delta t=10$ anni, Metodo ML

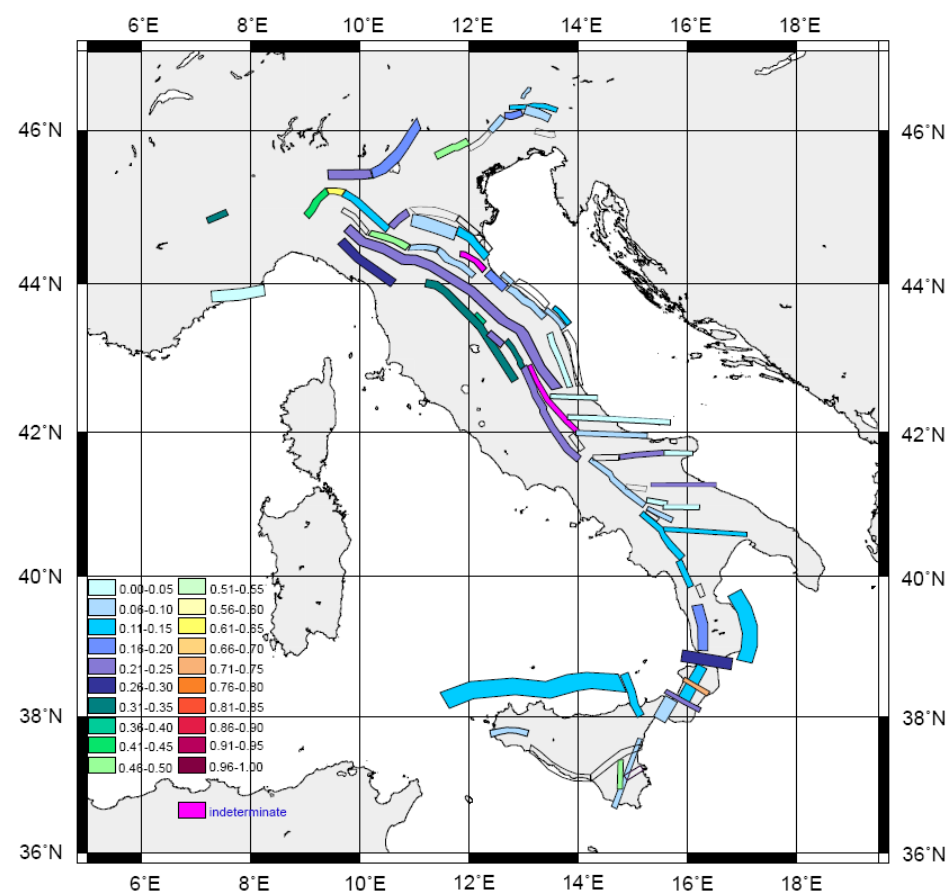


Fig 22 $\Delta t=10$ anni, Metodo SO

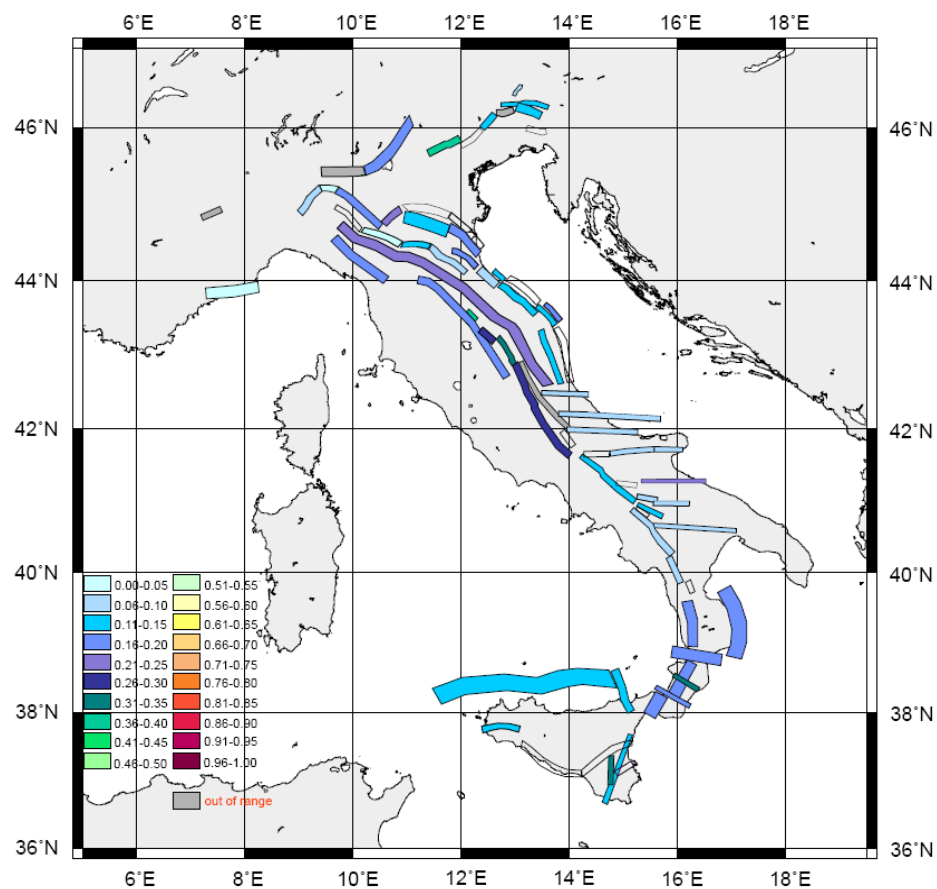


Fig 23 $\Delta t=10$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 21, 22 e 23 emerge che per $\Delta t=10$ anni tutti i metodi denunciano rischio più severo per le aree dell'Appennino centro settentrionale e le aree dell'Arco Calabro.

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=10$ anni sono mediamente comprese tra:

- ML 0.06 – 0.35
Situazione critica SA23, SA80
- SO 0.06 – 0.50
Situazione critica SA11 e SA40, SA 44 e SA80,
- ME 0.06 – 0.45
Risentono della troncatura SA02, SA40, SA23, SA62

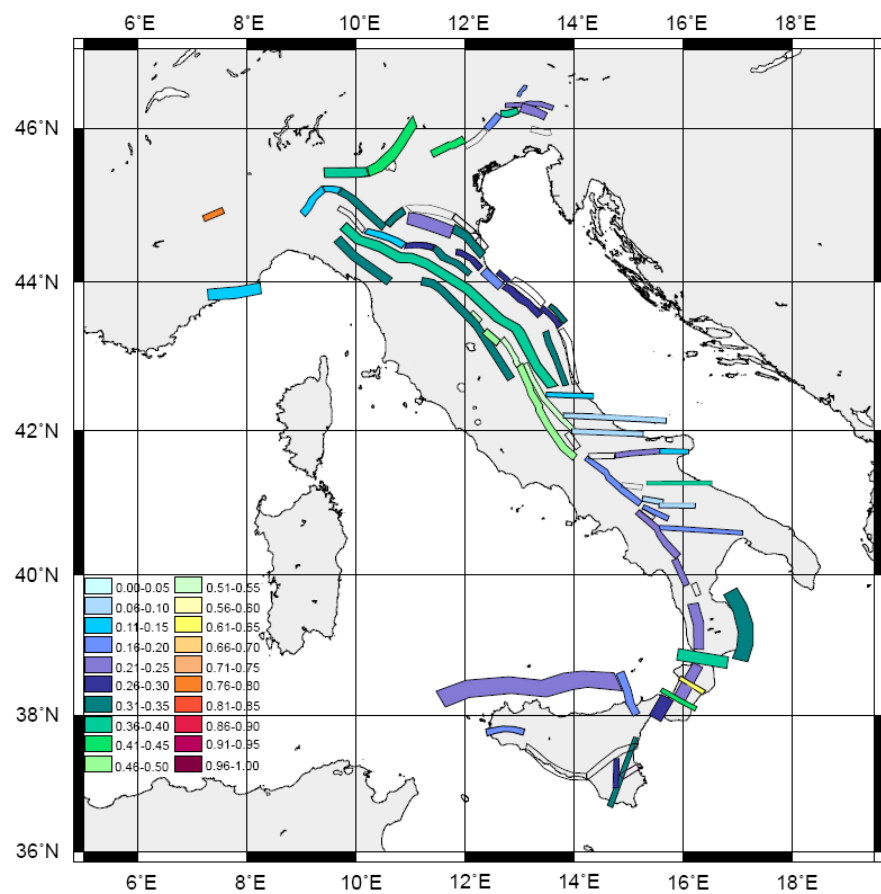


Fig 24 $\Delta t=20$ anni, Metodo ML

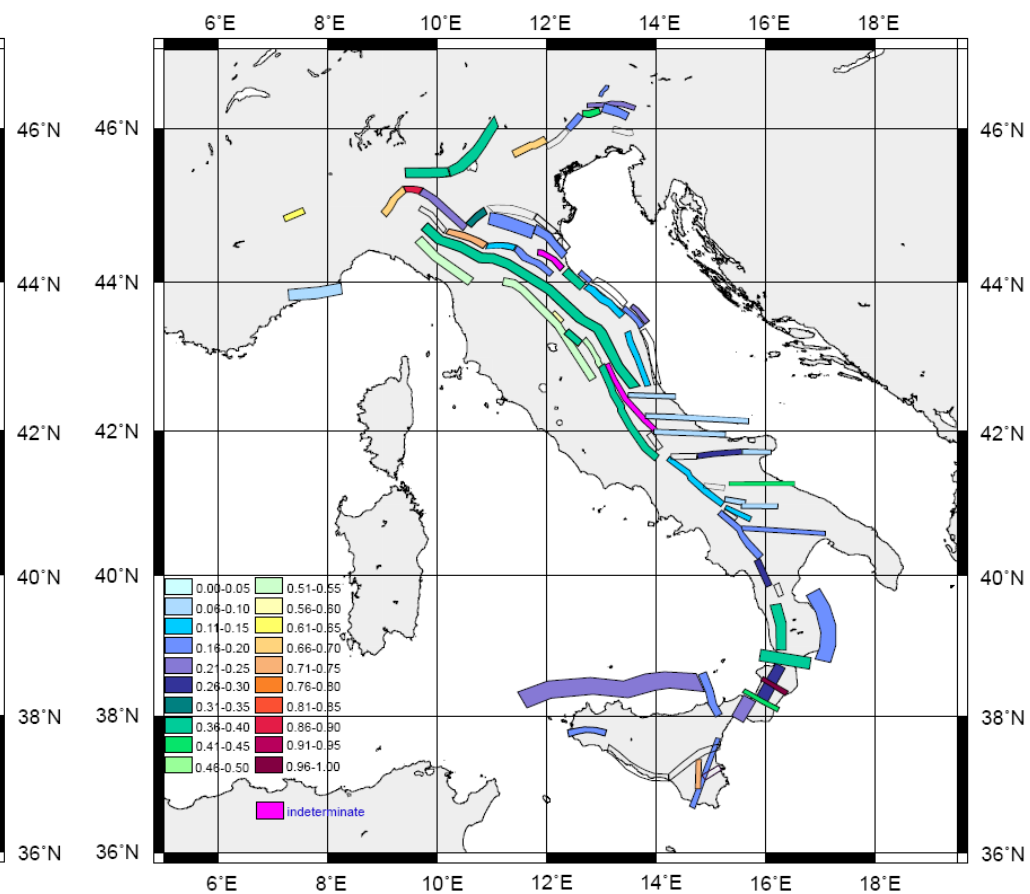


Fig 25 $\Delta t=20$ anni, Metodo SO

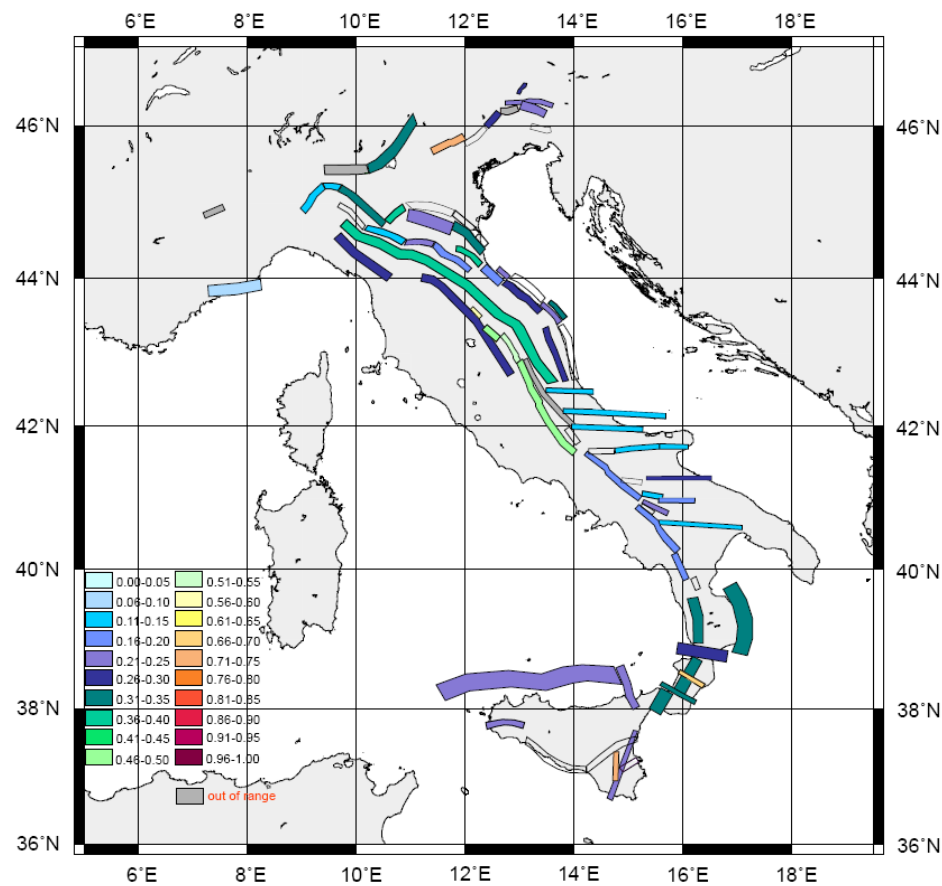


Fig 26 $\Delta t=20$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 24, 25 e 26 emerge che per $\Delta t=20$ anni tutti i metodi denunciano ancora rischio severo per le aree dell'Appennino centro settentrionale e le aree dell'Arco Calabro.

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=20$ anni sono mediamente comprese tra:

- ML 0.11 – 0.55
Situazione critica SA23, SA80
- SO 0.11 – 0.75
Situazione critica SA11 e SA40, SA 44 e SA80,
- ME 0.11 – 0.50
Situazione critica SA07, SA35 e SA80
Risentono della troncatura SA02, SA40, SA23, SA62

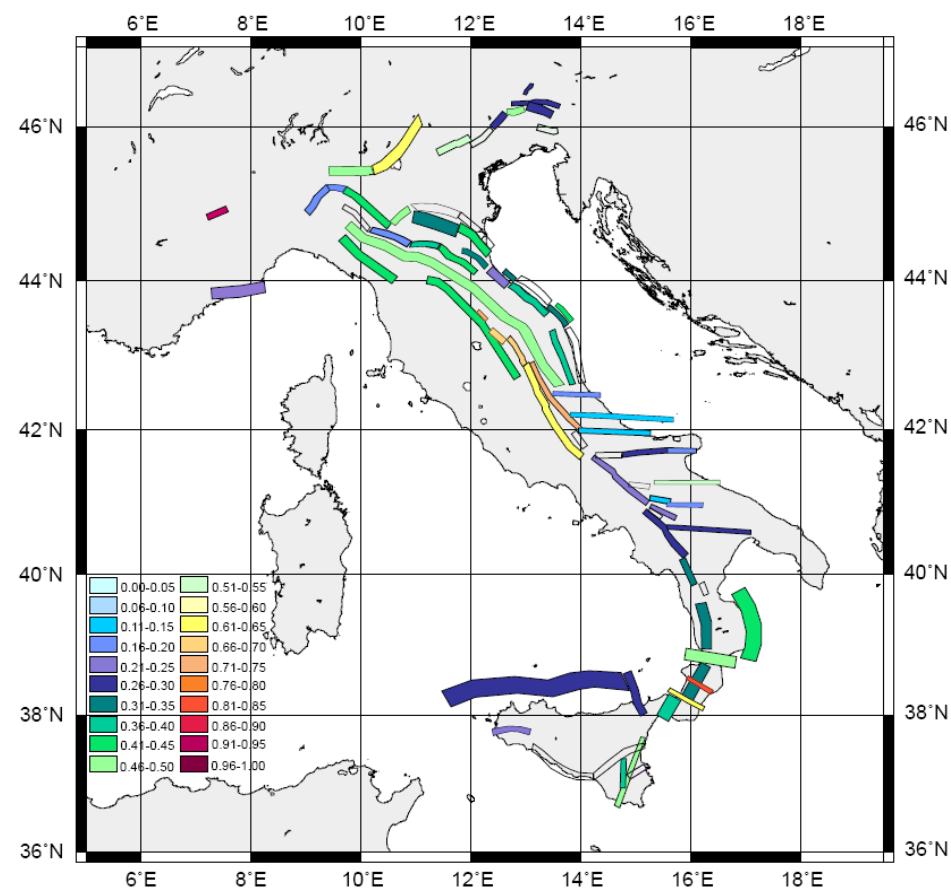


Fig 27 $\Delta t=30$ anni, Metodo ML

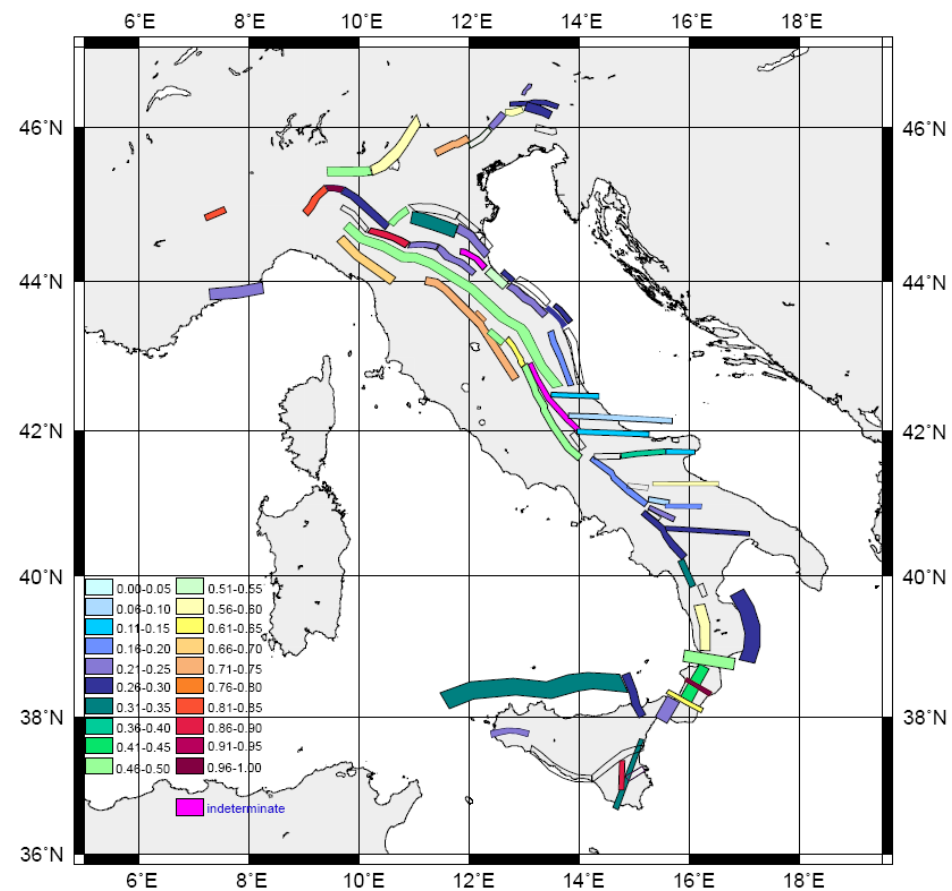


Fig 28 $\Delta t=30$ anni, Metodo SO

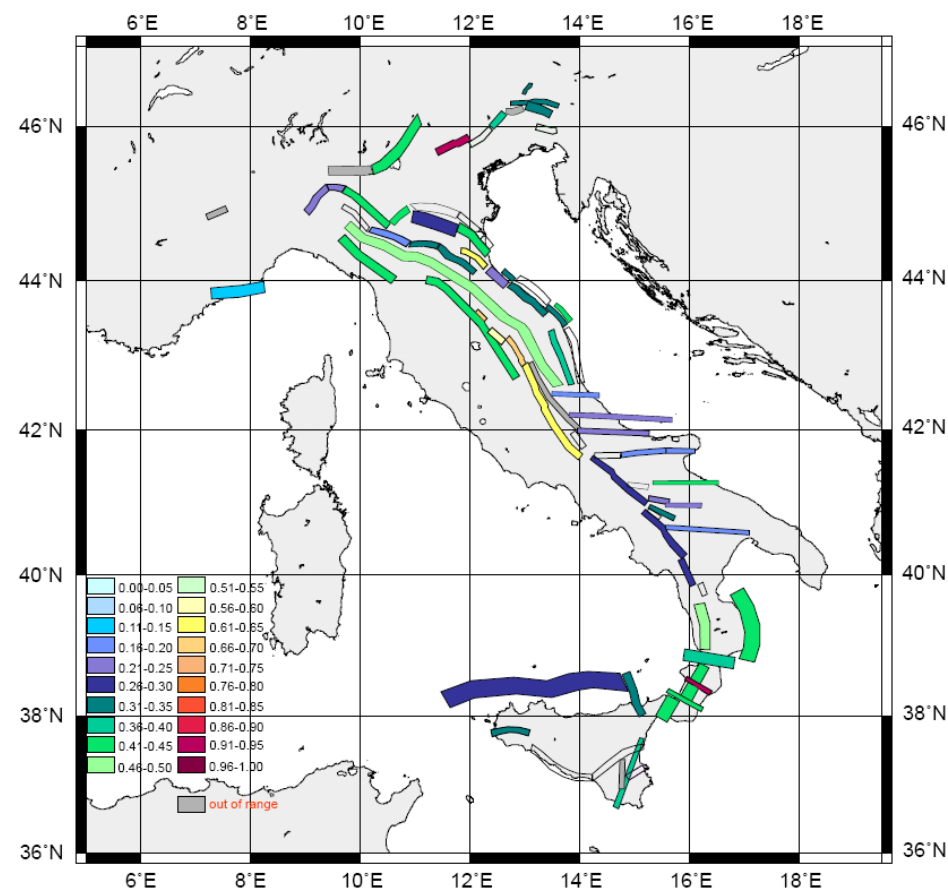


Fig 29 $\Delta t=30$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 27 28 e 29 emerge che anche per $\Delta t=30$ anni le aree a maggior rischio sembrano essere dell'Appennino centro settentrionale e le aree dell'Arco Calabro.

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=30$ anni sono mediamente comprese tra:

- ML 0.16 – 0.70
Situazione critica SA23, SA80
- SO 0.16 – 0.85
Situazione critica SA11 e SA40, SA 44, SA 46 e SA80,
- ME 0.16 – 0.70
Situazione critica SA07, e SA80
Risentono della troncatura SA02, SA23, SA35, SA62

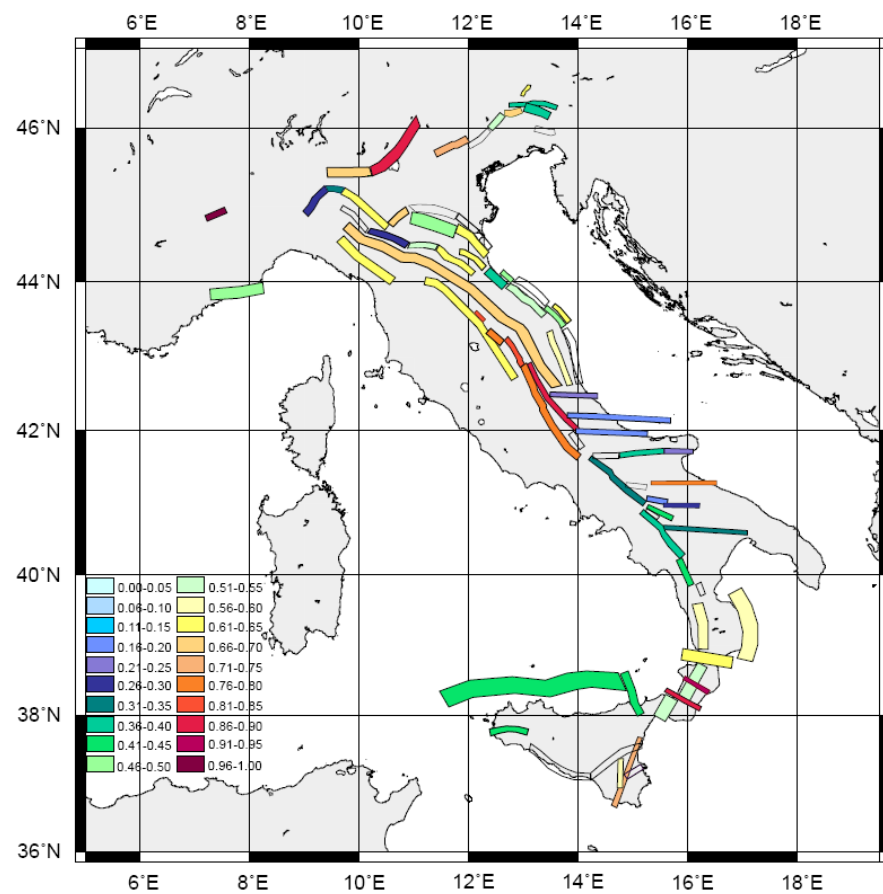


Fig 30 $\Delta t=50$ anni, Metodo ML

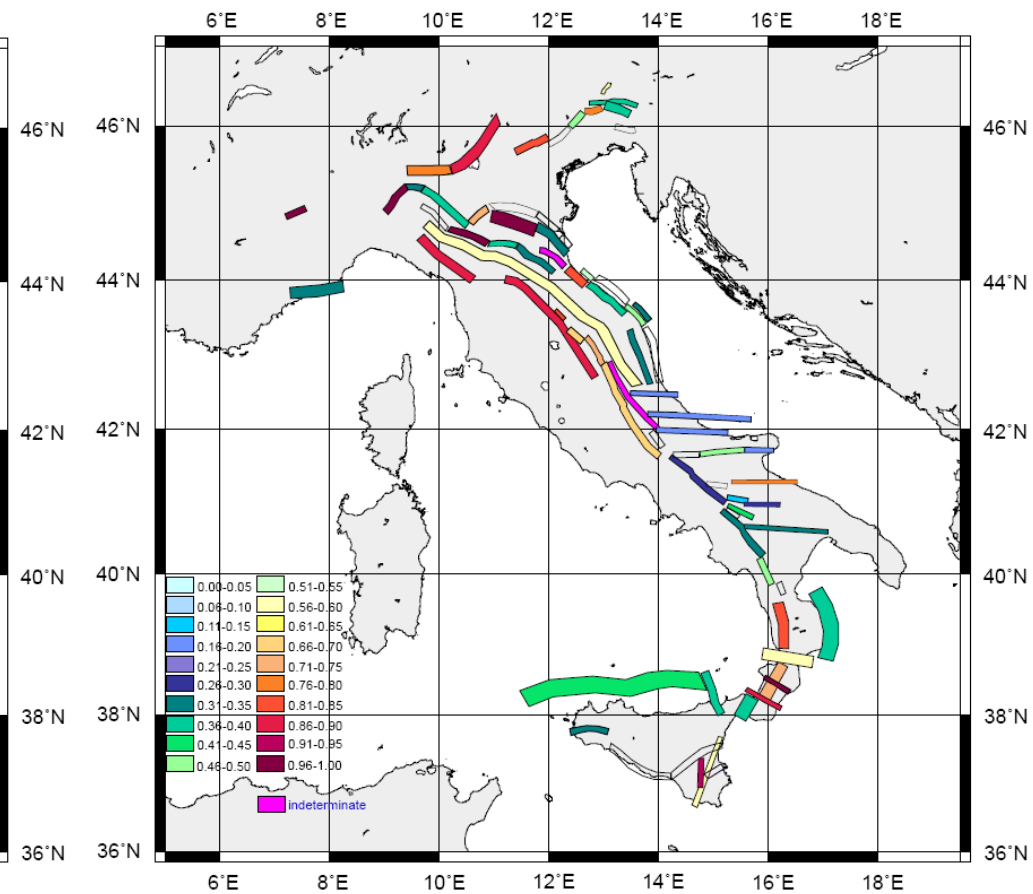


Fig 31 $\Delta t=50$ anni, Metodo SO

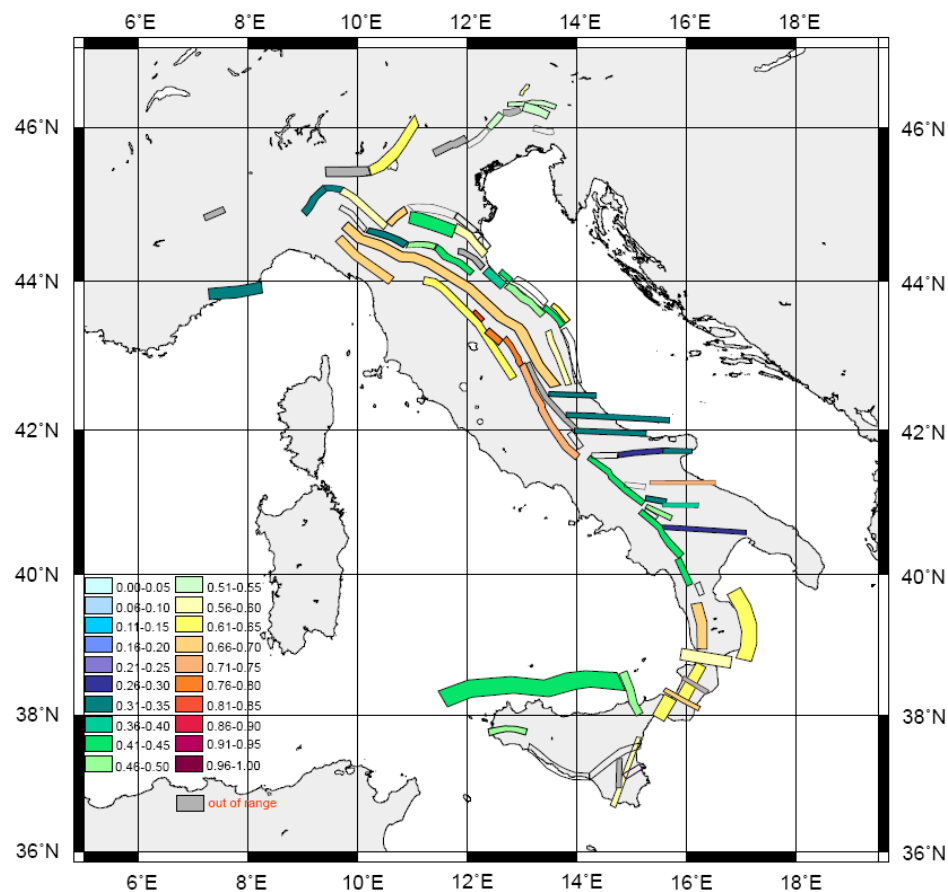


Fig 32 $\Delta t=50$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 30, 31 e 32 emerge che anche per $\Delta t=50$ anni le aree a maggior rischio sembrano essere dell'Appennino centro settentrionale e le aree dell'Arco Calabro.

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=50$ anni sono mediamente comprese tra:

- ML 0.20 – 0.75
Sempre con la presenza di situazioni più o meno critiche
- SO 0.30 – 0.90
Sempre con la presenza di situazioni più o meno critiche
- ME 0.25 – 0.75
Sempre con la presenza di situazioni più o meno critiche
Risentono della troncatura SA02, SA11, SA23, SA35, SA62

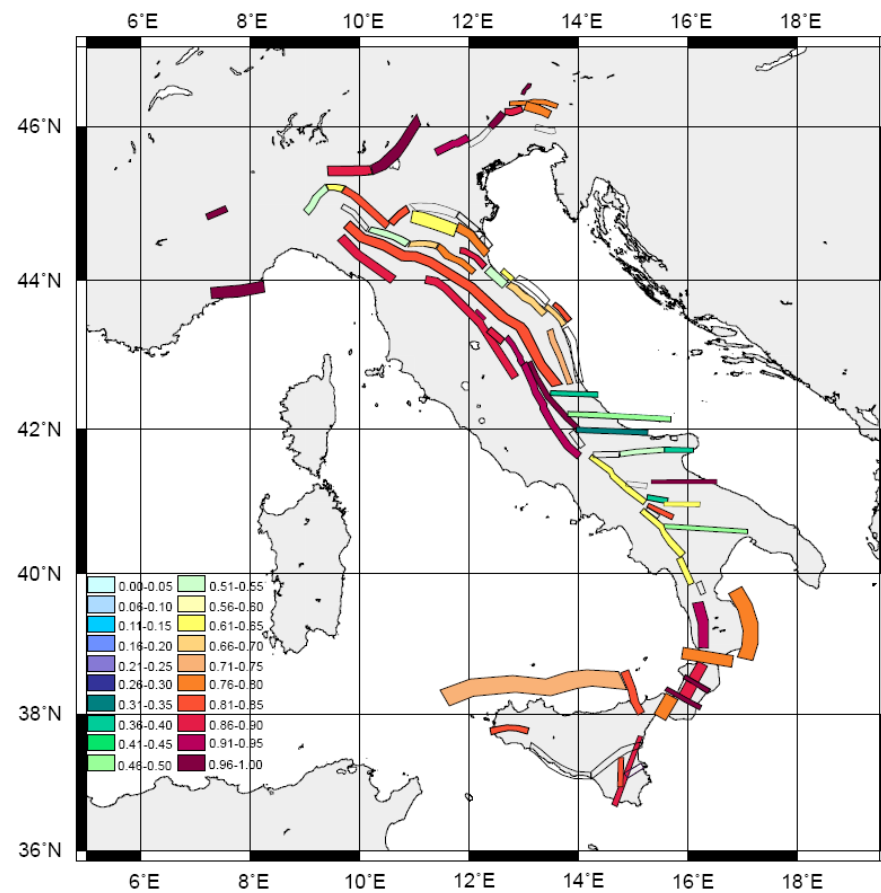


Fig 33 $\Delta t=100$ anni, Metodo ML

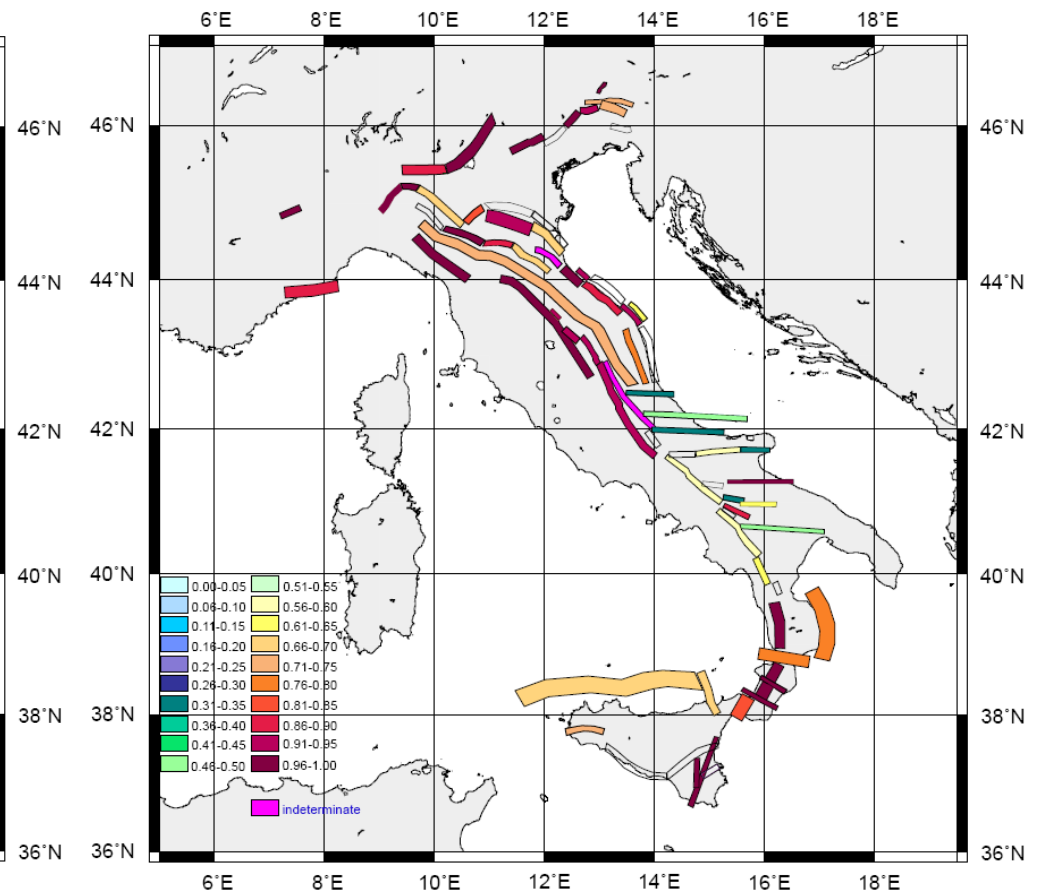


Fig 34 $\Delta t=100$ anni, Metodo SO

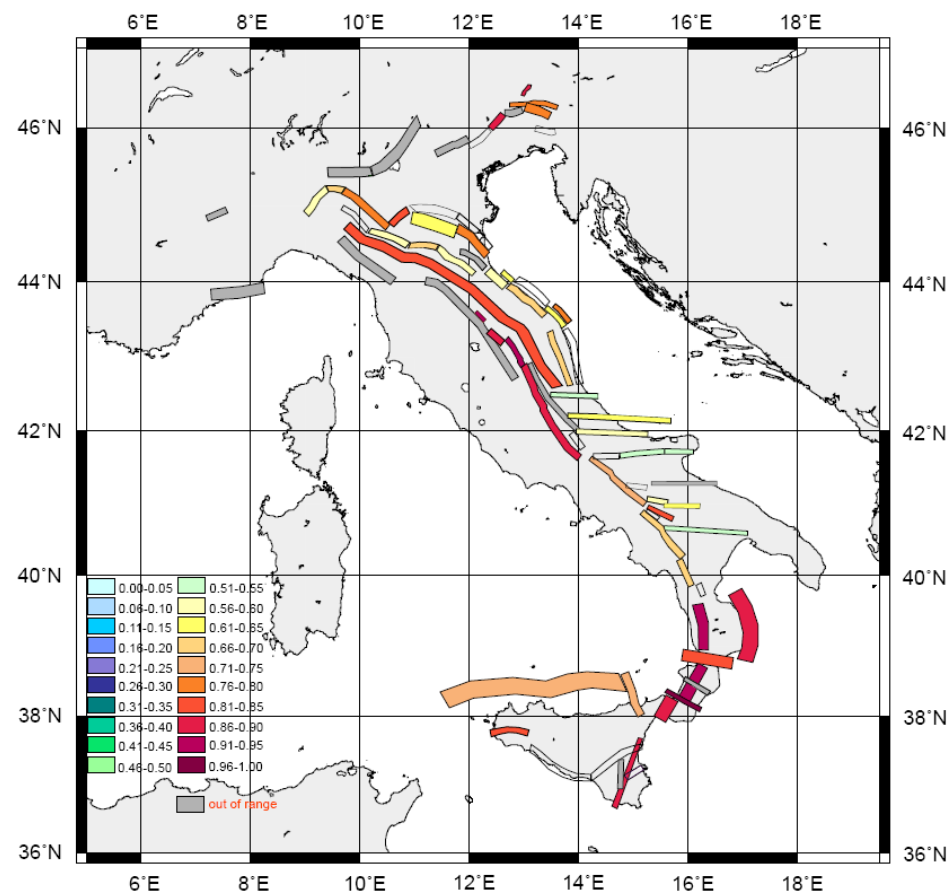


Fig 35 $\Delta t=100$ anni, Metodo ME

Dalle Figure 33, 34 e 35 emerge che anche per $\Delta t=100$ anni le aree a maggior rischio sembrano essere dell'Appennino centro settentrionale e le aree dell'Arco Calabro. Le aree a rischio moderato sembrano essere le aree di trascorrenza dell'Abruzzo e Molise.

Le probabilità di accadimento per $\Delta t=100$ anni sono mediamente comprese tra:

- ML 0.45 – 1.00
Con la presenza qualche situazione meno critica
- SO 0.45 – 1.00
Con la presenza qualche situazione meno critica
- ME 0.51 – 1.00
Sempre con la presenza di situazioni più o meno critiche
A questo punto sono molte le aree che risentono della troncatura.

6 CONCLUSIONI

Nel delicatissimo problema della previsione, se è lecito pensare che il meccanismo di generazione dei terremoti forti risenta solo del tempo trascorso dall'ultimo, se è lecito in tale ambito restringere il ventaglio delle ipotesi possibili, se è ragionevole accettare una previsione asintotica stazionaria, un modello di mistura ex-w assieme a un criterio puramente empirico conducono ad una background prediction che pensiamo possa giudicarsi degna di attenzione nonché credibile base per ulteriori affinamenti.

È ben noto quali incertezze siano coinvolte nei problemi di previsione. Un elemento forte di giudizio ci sembra fornito dall'analisi di credibilità introdotta che rende preferibile la mistura ex-w anche quando, come spesso accade per la situazione sismica italiana, l'ipotesi poissoniana non sembra decisamente da scartare né la presenza di un terremoto caratteristico da accettare.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata svolta nell'ambito dei Progetti INGV-DPC: Progetti Sismologici di Particolare Interesse per il DPC – Progetto S2 “Valutazione del potenziale sismogenetico e probabilità dei forti terremoti in Italia”. Gli autori rivolgono un sincero ringraziamento ai Coordinatori Nazionali del progetto: dott. D. Slajko e dott. G. Valensise, alla dott. L. Peruzza, coord. Task4, all'INGV e al Dipartimento di Protezione Civile per il supporto offerto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Grandori G., Guagenti E., Tagliani A. “A proposal for comparing the reliabilities of alternative seismic hazard models”. *Journal of Seismology*, 2, 27-35, 1998.
- Grandori G., Guagenti E., Tagliani A. “Magnitude distribution versus local seismic hazard”. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 3, 1091-1098, 2003.
- Grandori G., Guagenti E., Petrini L. “Earthquake catalogues and modelling strategies. A new testing procedure for the comparison between competing models”. *Journal of Seismology*, 10(3), 259–269, 2006.
- Guagenti E., Garavaglia E., Petrini L. “Probabilistic Hazard Models: is it Possible a Statistical Validation?” in: “*System – based Vision for Strategic and Creative Design*”, *Proc. of ISEC02, 2nd Int. Structural Engineering and Construction Conf*, Rome, Italy, U.E., September 23 – 26, 2003, F. Bontempi Ed., A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, Vol. II, pp. 1211 – 1216, 2003.
- Guagenti E., Garavaglia E., Petrini L. “A proposito di validazione” *Atti di ANIDIS04, XI Conv. Naz. “L’Ingegneria sismica in Italia*”, Genova, 25-29 gennaio 2004, a cura di S. Lagomarsino e S. Resemini, SGEEditoriali, Padova, CD-Rom, 2004.
- Tagliani A. “Principle of maximum entropy of probability distributions: definition of applicability field” *Prob. Eng. Mech.*, 4, 2, 1989.
- Tagliani A. “On the existence of maximum entropy distributions with four and more assigned moments”, *Prob. Eng. Mech.*, 4, 167-170, 1990.