

### ANALISI DELLA SISMICITÀ

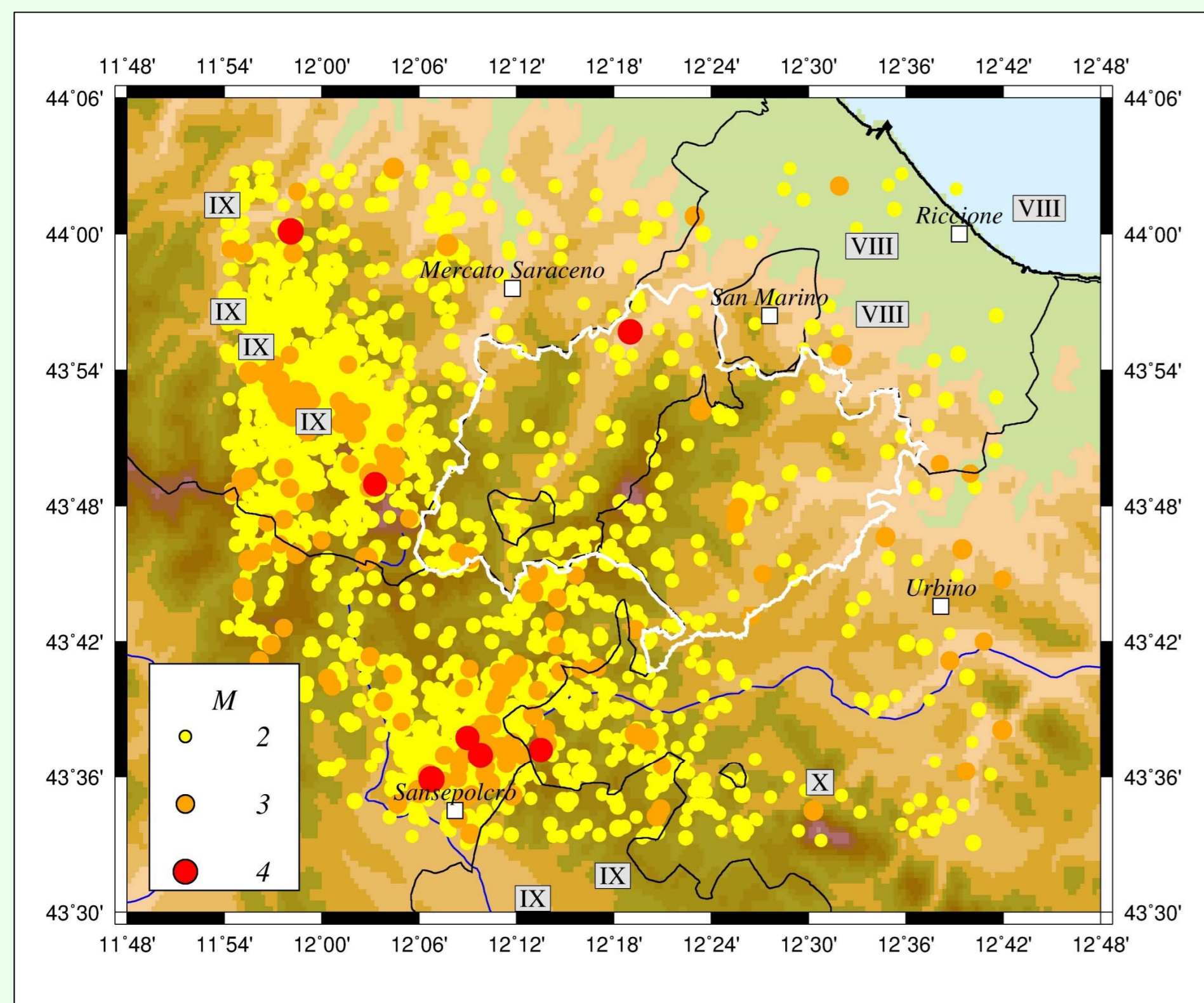


Fig. 1 - Sismicità del Montefeltro (area contornata in bianco) e zone limitrofe dal 1/1/1985 al 31/12/2017 (database ISIDE) con magnitudo  $M \geq 2$ . I rettangoli mostrano la sismicità storica con  $I_0 \geq VIII$  (catalogo CPTI15, Rovida *et al.*, 2016).

Il data set di partenza è stato approntato estraendo dal catalogo ISIDE gli eventi della area del Montefeltro (area contornata in bianco nella Fig. 1) e gli eventi che ricadevano in una fascia delle zone circostanti larga circa 10 km. Dopo una prima localizzazione eseguita con il codice di calcolo Hypoellipse (Lahr, 1999), l'insieme è stato integrato con un 5% circa di picking nuovi o rideterminati (essenzialmente fasi S), aggiunti per migliorare le soluzioni ipocentrali. Il data set finale consta di 402 eventi, per un numero complessivo di arrivi pari a 6736, di cui 3826 di fasi P e 2910 di fasi S.

Layer	Depth (km)	$V_p$ (km/s)	$V_p/V_s$
1	0.0	5.7	1.78
2	12.0	6.0	1.78
3	18.0	6.2	1.78
4	26.0	6.7	1.78
5	35.0	7.5	1.78
6	100.0	8.0	1.78

Tab. 1 - Modello di velocità 1-D usato per la rilocalizzazione dei terremoti (Santini *et al.*, 2011).

Tab. 2 - Risultati della rilocalizzazione dei terremoti con Hypoellipse. Accanto alla qualità della soluzione, sono riportati il valore massimo dell'errore nella direzione meno

Qualità	Errore massimo tra SEH e SEZ	N
A	$\leq 1.34$	167
B	$\leq 2.67$	126
C	$\leq 5.35$	84
D	$> 5.35$	25

$rms$  medio = 0.20s (402 eventi);  $V_p/V_s$  medio = 1.81 (363 eventi);  $St. dev.$  = 0.39

Picking accuracy	Weight Code: 0 1 2 3	Standard Error (s): 0.1 0.25 0.50 1.00
------------------	----------------------	--

vincolata e il numero di eventi che hanno soddisfatto tale condizione. SEH e SEZ danno una stima rispettivamente del maggiore dei semi-assi orizzontali e del semi-asse verticale dell'ellissoide dell'errore ipocentrale per un livello di confidenza del 68%. Il rapporto  $V_p/V_s$  è calcolato su tutte le coppie di fasi P e S disponibili e con errori associati ad entrambi gli arrivi. Gli errori in oggetto sono determinati dai pesi assegnati alle singole letture secondo lo schema riportato.

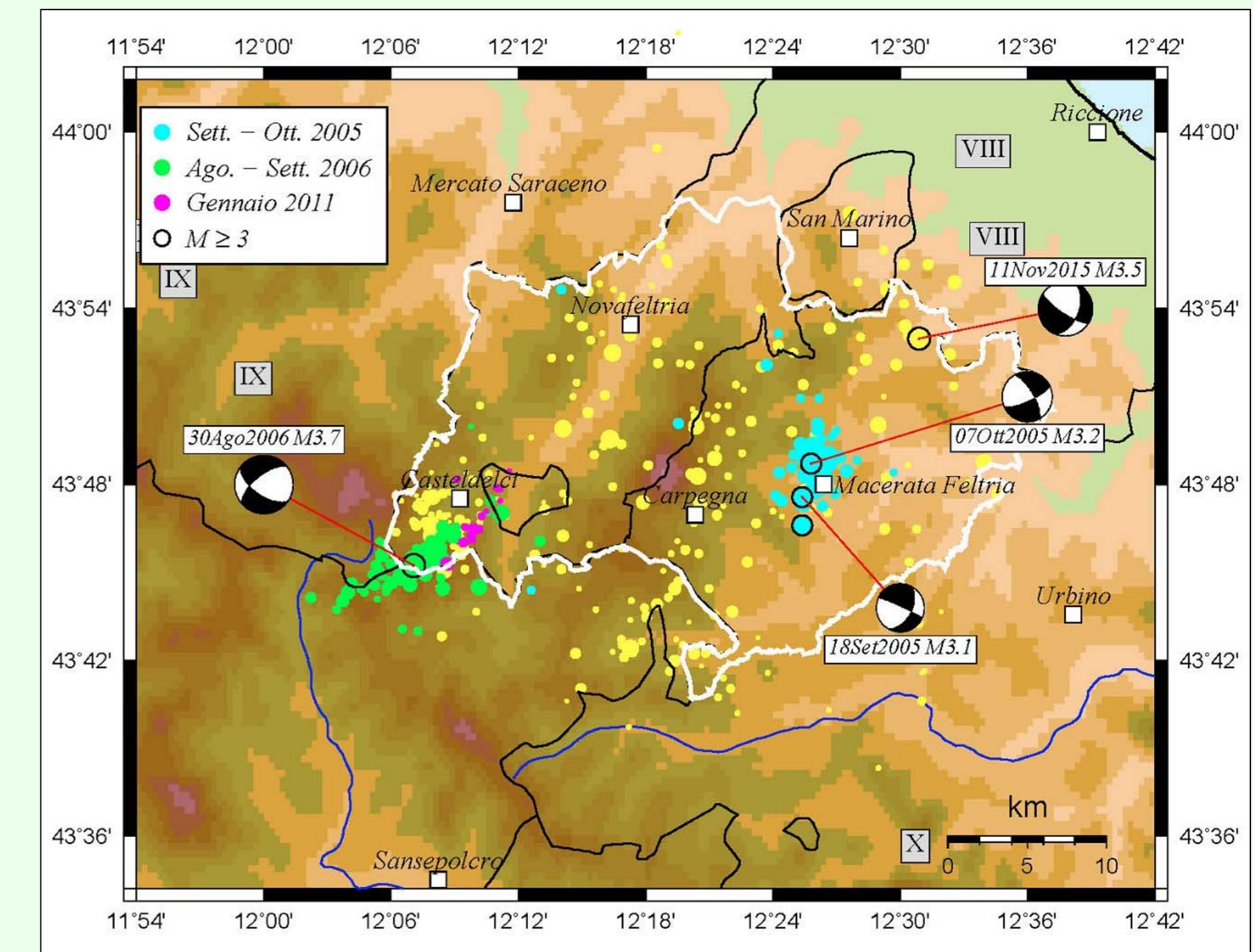
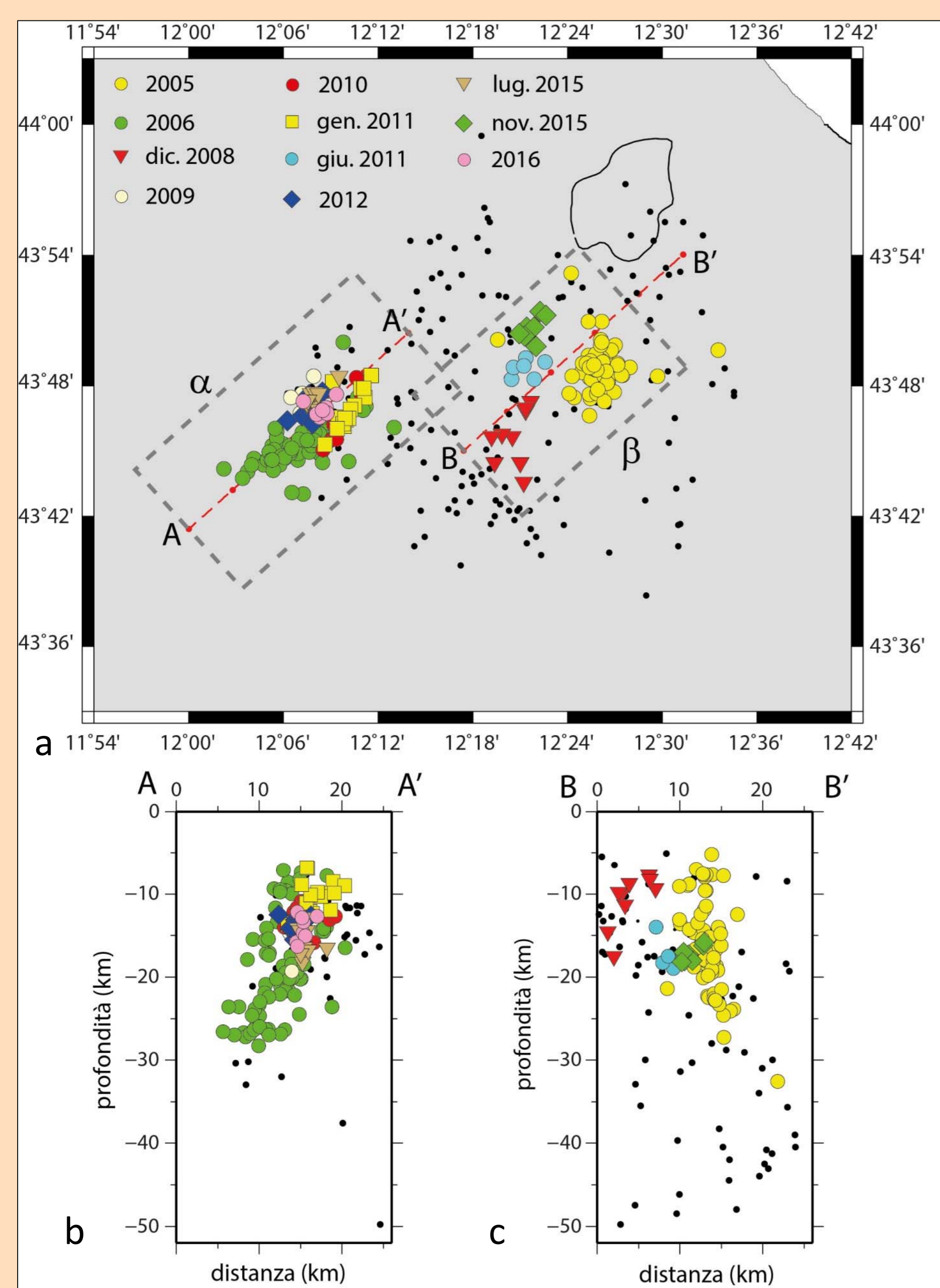


Fig. 2 - Mappa dei 402 epicentri. I cerchi gialli rappresentano la sismicità di fondo mentre gli altri colori evidenziano gli eventi associati alle fasi di maggiore attività:

- settembre-ottobre 2005 - Macerata Feltria (PU) (celesti);
- agosto-settembre 2006 - Casteldelci (RN) (verdi);
- piccolo burst del 26-27 gennaio 2011 - Casteldelci (magenta)

I rettangoli mostrano la sismicità storica con  $I_0 \geq VIII$ . Sono rappresentati inoltre i meccanismi focali degli Eventi con  $M_L \geq 3$  calcolati tramite programma PFFIT (Reasenber and Oppenheimer, 1985).

### ANALISI DEI CLUSTER



Per l'individuazione anche delle sequenze più piccole è stato applicato il metodo di Reasenber (1985) tramite il software ZMAP (Wiemer, 2001), scegliendo per i parametri degli opportuni valori iniziali e facendoli variare in determinati range di valori

Fig. 3 - a) Mappa delle sequenze ottenute con il programma ZMAP (Wiemer, 2001) con almeno 6 eventi clusterizzati; b) Proiezione delle sequenze contenute nel riquadro tratteggiato grigio  $\alpha$  lungo la sezione AA'; c) proiezione delle sequenze contenute nel riquadro tratteggiato grigio  $\beta$  lungo la sezione BB'. Gli eventi declusterizzati sono identificati con i punti neri.

valore	$\tau_{min}$ (gg)	$\tau_{max}$ (gg)	P	$X_{meff}$	$R_{fact}$ (km)	ERH (km)	ERZ (km)
iniziale	1	20	0.95	1.4	5	1.0	2.0
minimo	1	10	0.90	1.4	5	1.0	2.5
massimo	1	20	0.99	1.5	30	2.0	5.0

Tab. 3 - Valore iniziale e range di variazione dei parametri utilizzati nell'applicare l'algoritmo di Reasenber sul catalogo dei terremoti rilocalizzato.  $\tau_{min}$  e  $\tau_{max}$  indicano rispettivamente il tempo minimo e massimo di attesa nell'osservare un successivo evento con una certa probabilità P,  $X_{meff}$  è la magnitudo di completezza,  $R_{fact}$  la lunghezza di scala per individuare la zona in cui si considera un evento appartenente al cluster, ERH e ERZ gli errori orizzontale e verticale delle coordinate ipocentrali..

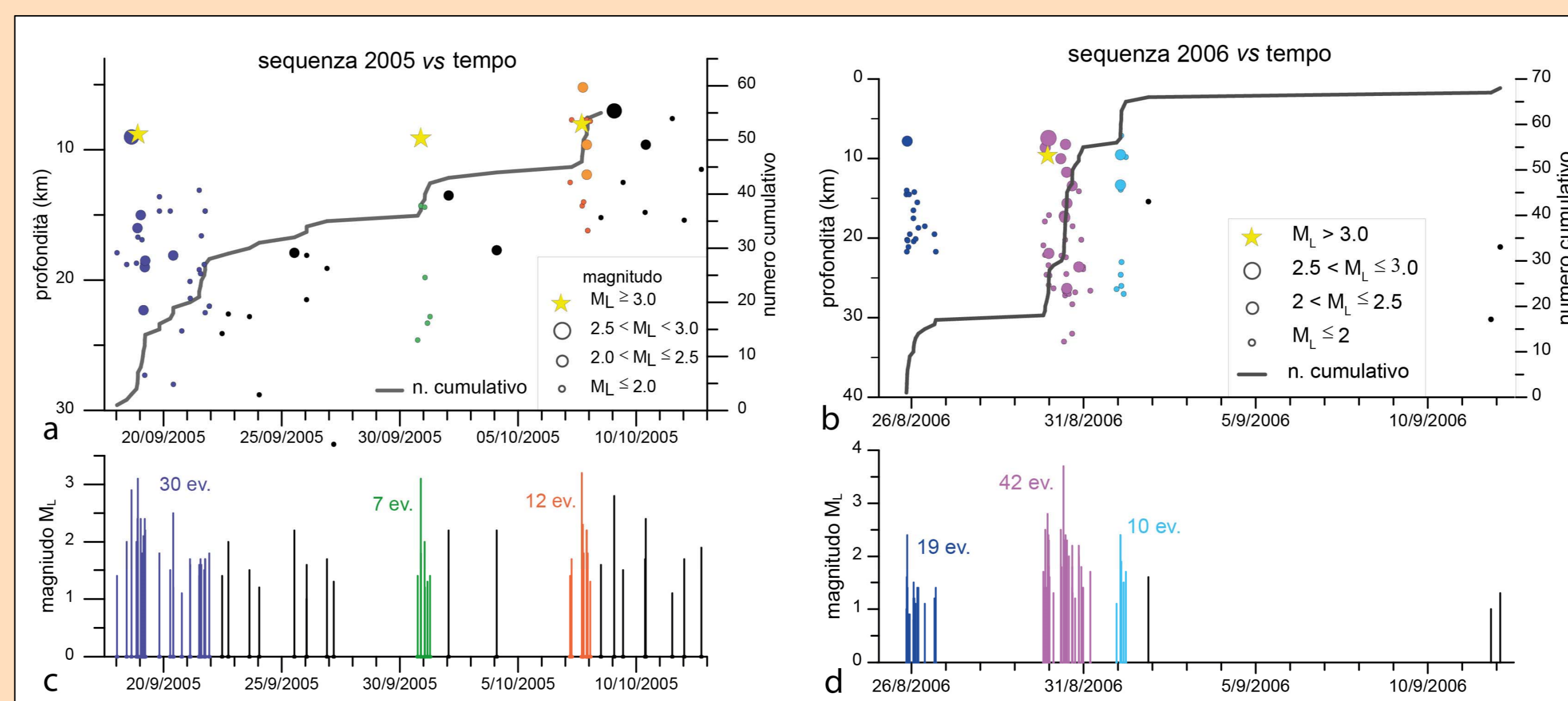


Fig. 4 - a) e b) Curve cumulative e andamento temporale della profondità rispettivamente per le sequenze 2005 e 2006. c) e d) Andamenti temporali della magnitudo rispettivamente per le sequenze 2005 e 2006.

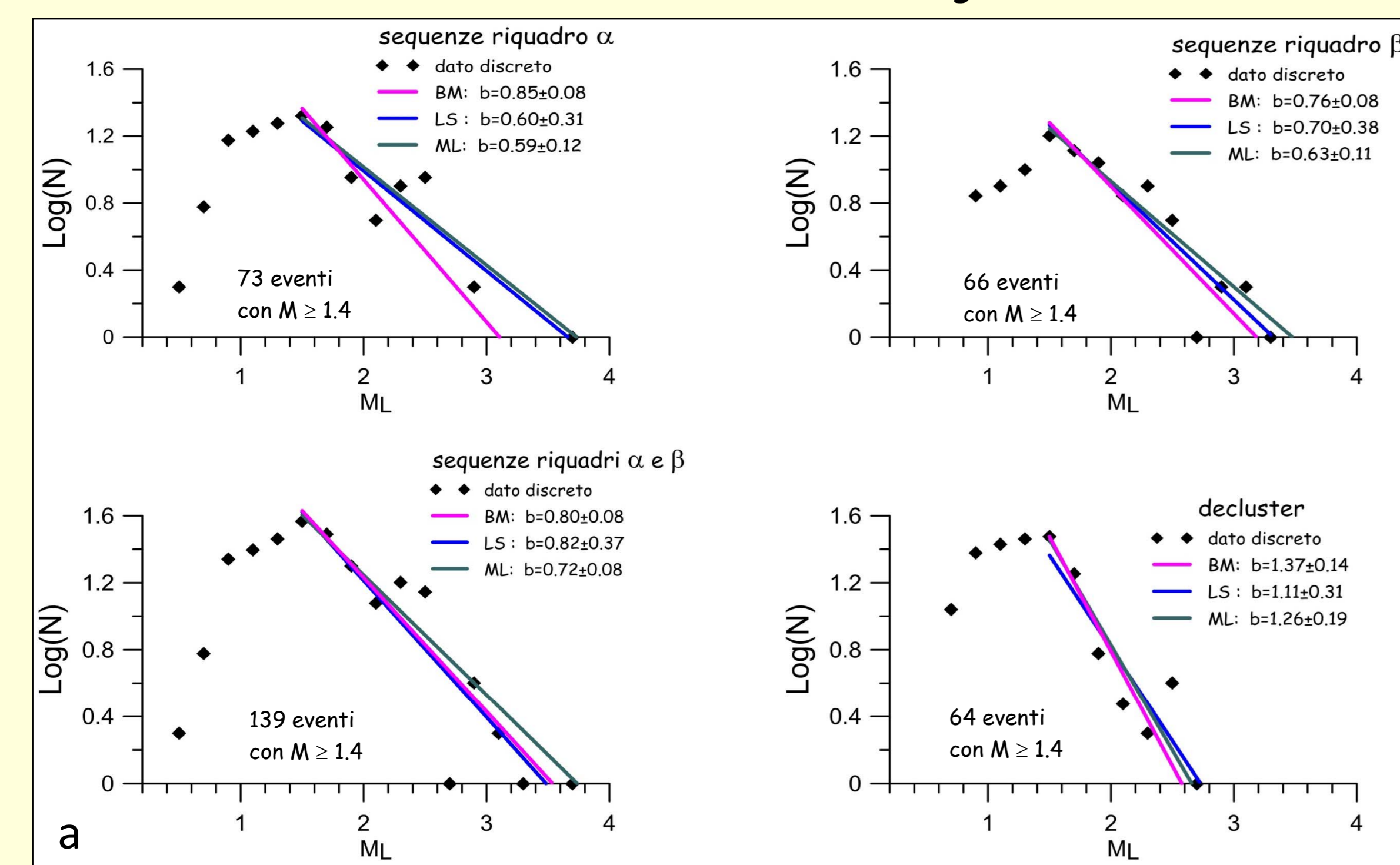
La sequenza di Macerata Feltria è marcata da tre scosse di magnitudo  $M_L \geq 3.0$  ed appare più circoscritta nello spazio rispetto a quella di Casteldelci, contraddistinta invece da due scosse di rilievo ( $M_L = 2.8$  e  $M_L = 3.7$ ) registrate il 29 e il 30 agosto a poche ore l'una dall'altra. In entrambi i casi, comunque, gli eventi più forti (di magnitudo 3.2 e 3.7 rispettivamente) sono avvenuti nella fase intermedia degli episodi, come tipicamente accade negli sciame di terremoti (Fisher *et al.*, 2014). Nel caso poi di Macerata Feltria, il comportamento swarm-like del cluster è ulteriormente enfatizzato dalla sua evoluzione temporale che non presenta una scossa principale dominante ma piuttosto una serie di terremoti di magnitudo similari. Sciame sismici

ricorrenti sono frequentemente osservati lungo gli Appennini (Frepoli *et al.*, 2017), spesso concentrati nella crosta superiore in intervalli di profondità di alcuni chilometri, e generalmente associati a processi che coinvolgono la migrazione dei fluidi ivi presenti (Hainzl *et al.*, 2012).

### b-value

- La stima del b-value è stata calcolata tramite
- metodo dei minimi quadrati (LS)
  - metodo della massima verosimiglianza (ML)
  - metodo statistico di Bender (BM)

per i riquadri  $\alpha$  e  $\beta$  in cui sono avvenute le due principali sequenze, aggiungendo nella stima anche le altre sequenze che ricadono in ogni singola area sotto l'ipotesi che il meccanismo che le abbia generate sia lo stesso.



Il metodo statistico di Bender (1983) rispetto agli altri due metodi, tiene conto delle fluttuazioni che possono esserci per ogni classe in magnitudo o in numero di eventi, della considerazione che la Gutenberg-Richter in realtà è limitata superiormente dalla massima magnitudo storica avvenuta nell'area in esame ( $M_{max}$  storica = 6.0).

Fig. 5 - a) I valori di b ottenuti sono minori di 1 sia per i singoli riquadri  $\alpha$  e  $\beta$  (Fig. 3) che per l'unione dei due, mentre per il catalogo declusterizzato (con eventi di profondità minore di 30 km) sono significativamente diversi con una stima maggiore di 1 (1.11 - 1.37).

b) Questo risultato è confrontabile con quello calcolato da Megna *et al.* 2000 ( $1.3 \pm 0.1$ ), in cui si analizza la sismicità declusterizzata della regione Umbria-Marche da gennaio 1987 a maggio 1999 (b-value calcolato con il metodo di Bender per celle  $40 \times 40$  km<sup>2</sup> con almeno 70 eventi)

### Note conclusive e futuri sviluppi

- ❖ L'analisi effettuata evidenzia una evoluzione spazio-temporale delle sequenze piuttosto articolata, con vari impulsi dell'attività e profondità di enucleazione che raggiungono anche i 20-25 km.
- ❖ La regione che comprende il Montefeltro è purtroppo ancora oggi non adeguatamente coperta dal punto di vista strumentale e ciò limita l'analisi di dettaglio della sismicità di fondo, il calcolo dei meccanismi focali per gli eventi di piccola magnitudo e una stima più attendibile del b-value.
- ❖ Per questo è in fase di studio un esperimento di monitoraggio con una rete temporanea di stazioni mobili.

### Bibliografia

Bender B.; 1983: Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data, Bull. Seismol. Soc. Am., 73, 831-851.  
 Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K., Kämpf, H., (2014). Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review, *Tectonophysics*, 611, 1-27.  
 Frepoli A., Cimini G. B., De Gori P., De Luca G., Marchetti A., Monna, S., Montuori C. e Pagliuca N. M.; 2017: Seismic sequences and swarms in the Latium-Abruzzi-Molise Apennines (Central Italy): new observations and analysis from a dense monitoring of the recent activity, *Tectonophysics*, 712-713, 312-329.  
 Hainzl, S., Fischer T. and Dahm, T.; 2012: Seismicity-based estimation of the driving fluid pressure in the case of swarm activity in Western Bohemia. *Geophys. J. Int.*, 191 (1), 271-281.  
 Lahr J.C.; 1999: Revised 2012, HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. USGS Open-File Report 99-23, version 1.1, 119 pp.  
 Megna A., Barba S., Santini S. and Vetranò, F.; 2000: Space-time variations of the Umbria-Marche region instrumental seismicity. *Annali di Geofisica*, 43, 921-937.  
 Reasenber E.A.; 1985: Second-order moment of central California seismicity. *J. Geophys. Res.*, 90, 5479-5495.  
 Reasenber E. and Oppenheimer D.; 1985: PFFIT, FPLOT and FPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions. USGS Open-file Report, 85-730, 109.  
 Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B. and Gasperini P. (eds); 2015: The 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:https://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15  
 Santini S., Saggese F., Megna A. and Mazzoli S.; 2011: A note on central-northern Marche seismicity: new focal mechanisms for events recorded in years 2003-2009. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 52, 639-649.  
 Wiemer S.; 2001: A software package to analyze seismicity. ZMAP. *Seism. Res. Lett.*, 72, 373-382.