

CARATTERIZZAZIONE STATISTICA DI SEQUENZE E SCIAMI SISMICI NELL'ITALIA NORD-ORIENTALE

A. Peresan, S. Gentili

Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, OGS, Centro Ricerche Sismologiche, Udine

Una definizione attendibile delle proprietà che caratterizzano l'evoluzione spazio-temporale della sismicità fornisce indicazioni importanti per la comprensione dei processi tettonici in atto alla transizione Alpi-Dinaridi. Una rigorosa descrizione quantitativa rappresenta, inoltre, un'informazione particolarmente utile per inquadrare in modo opportuno gli eventi sismici di moderata intensità, che occasionalmente interessano l'area in esame, consentendo di evidenziare eventuali variazioni nel rilascio di energia sismica che si discostino dalla normale sismicità di fondo.

In tale prospettiva, è stata effettuata una analisi quantitativa dei *clusters* di sismicità nell'Italia nord-orientale adottando un nuovo approccio fisico-statistico, noto come metodo dei “*nearest-neighbours*” (Zaliapin e Ben-Zion, 2013; Zaliapin *et al.*, 2008; Baiesi e Paczuski, 2004). Il metodo consente una definizione formale dei *cluster* sismici particolarmente adatta per l'analisi dei terremoti di bassa e moderata magnitudo, per i quali le tecniche standard possono risultare troppo approssimative.

Per definire le caratteristiche della sismicità dell'Italia nord-orientale ci si è avvalsi delle informazioni contenute nei bollettini compilati presso il CRS-OGS, a partire dal maggio 1977. Poiché una quantificazione attendibile dell'evoluzione spazio-temporale della sismicità richiede l'uso di dati il più possibile completi ed omogenei, è stata effettuata una revisione preliminare dei bollettini della sismicità regionale, al fine di identificare possibili eventi mancanti e per rimuovere eventuali duplicati ed esplosioni (Peruzza *et al.*, 2015). Successivamente, è stata delineata l'area entro la quale i dati risultano sufficientemente completi per magnitudo $M \geq 2.0$ (Fig. 1), applicando diverse tecniche di analisi; in particolare è stata effettuata una analisi comparativa (per es. Romaskova *et al.*, 2009) con i dati globali ISC (ISC, 2015), che sono disponibili nella regione per i terremoti di dimensioni moderate (i.e. magnitudo superiore a 3.0). Sono stati considerati, inoltre, i risultati ottenuti da precedenti studi, mediante tecniche di analisi probabilistica della soglia di completezza dei dati (Gentili *et al.*, 2011).

Utilizzando i dati e l'area così definiti, è stato applicato il metodo dei “*nearest-neighbours*” (Zaliapin e Ben-Zion, 2013), che permette di individuare e caratterizzare, sulla base delle proprietà fisico-statistiche dei dati analizzati, i *clusters* di sismicità, separandoli dalla sismicità di fondo. Per consentire l'applicazione del metodo dei “*nearest-neighbour*” è necessario stimare i parametri di scala che caratterizzano l'occorrenza dei terremoti, ed in particolare il *b-value* e la dimensione frattale degli epicentri nell'area in esame. Infatti, il metodo consente una identificazione formale dei *cluster* di terremoti sulla base della distanza fra due eventi prossimi,

la *nearest-neighbours distance* η , nel dominio spazio-tempo-energia. Tale distanza può essere espressa come $\eta=TR$, ossia in funzione della distanza spaziale scalata (*rescaled distance*), R , e della distanza temporale scalata (*rescaled time*), T , calcolati utilizzando appunto il *b-value* e la dimensione frattale (Zaliapin *et al.*, 2008).

Per stimare i parametri di scala sono state applicate diverse metodologie, inclusi i tradizionali metodi per la stima del *b-value*, basati sulla classica legge frequenza-magnitudo (Gutenberg e Richter, 1954), e della dimensione frattale (Grassberger 1983, Rossi, 1990). In particolare è stata utilizzata la *Unified Scaling Law for Earthquakes*, USLE (Kossobokov and Mazhkenov, 1988; Kossobokov and Nekrasova, 2004; Nekrasova *et al.*, 2011), che fornisce una stima congiunta di entrambi i parametri. I parametri della USLE sono stati stimati su una griglia regolare, conteggiando i terremoti entro aree di dimensioni progressivamente decrescenti (tecnica “telescope”) a partire da $1^\circ \times 1^\circ$ e fino a $1/16^\circ \times 1/16^\circ$. I risultati forniti dalla USLE per il catalogo CRS-OGS entro il territorio considerato evidenziano un *b-value* variabile da poco più di 0.5 fino a 1.0, mentre la dimensione frattale della distribuzione degli epicentri varia da 0.6 a 1.3. A partire da tali risultati sono state ottenute delle robuste stime medie associabili all’intera regione analizzata, pari a $b = 0.9 \pm 0.02$ e $d = 1.1 \pm 0.05$ (Nekrasova *et al.*, 2016).

Il metodo dei “*nearest-neighbours*” è stato applicato alla sismicità regionale, effettuando una serie di esperimenti per valutare la stabilità dei risultati rispetto agli elementi liberi dell’analisi, tra i quali:

- l’intervallo temporale considerato;
- la soglia di magnitudo minima;
- le valori dei parametri di scala (*b-value* e dimensione frattale).

Lo studio effettuato ha consentito una caratterizzazione ben definita e stabile della sismicità in termini di sismicità di fondo e *clusters*. In particolare, i risultati ottenuti per il periodo 1977-2015 coperto dai dati CRS-OGS, evidenziano una sismicità caratterizzata da una prevalente componente *poissoniana* (cioè da un verificarsi casuale di eventi indipendenti fra loro, assimilabile alla sismicità di fondo) e da una componente *clusterizzata* (cioè sequenze e sciami, caratterizzati da distanze spazio-temporali relativamente brevi) molto limitata (Figg. 2a e 2b). L’analisi effettuata per il periodo 1950-2015, utilizzando un catalogo meno accurato ma temporalmente più esteso (i.e. UCI, Peresan *et al.*, 2001), evidenzia invece una componente *clusterizzata* ben sviluppata (Figg. 2c e 2d). Tale componente scompare, pur utilizzando i medesimi dati UCI, qualora si consideri il periodo 1977-2015, a conferma di quanto già osservato per i bollettini CRS-OGS. Ne consegue che l’intervallo temporale delle osservazioni disponibili gioca un ruolo importante per la caratterizzazione statistica delle sequenze di terremoti.

Le caratteristiche complessive della sismicità regionale fin qui menzionate sono stabili e robuste; la diversa scelta dei parametri di scala, della magnitudo minima e delle incertezze considerate, non altera sostanzialmente la distribuzioni statistiche delle distanze fra eventi prossimi rappresentate in Fig. 2. Una accurata definizione dei parametri di scala (*b-value* e dimensione frattale) e della relativa distanza di soglia che discrimina la componente *clusterizzata*

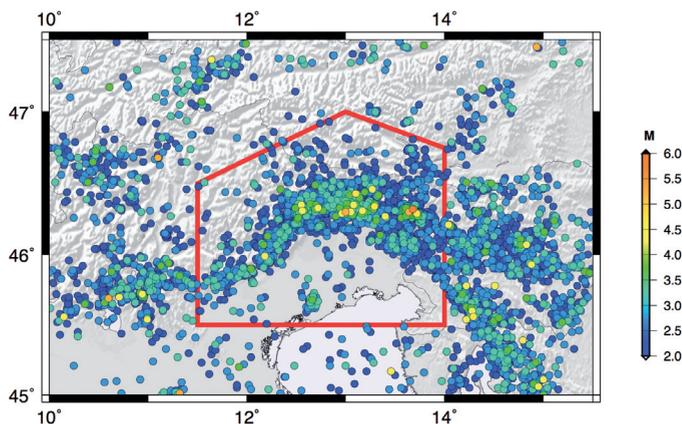


Fig. 1 – Mappa degli eventi sismici, con magnitudo maggiore o uguale a 2.0, riportati nei bollettini CRS-OGS nel periodo 1977-2013. Il poligono rosso delimita l’area selezionata per l’analisi di sequenze e sciami.

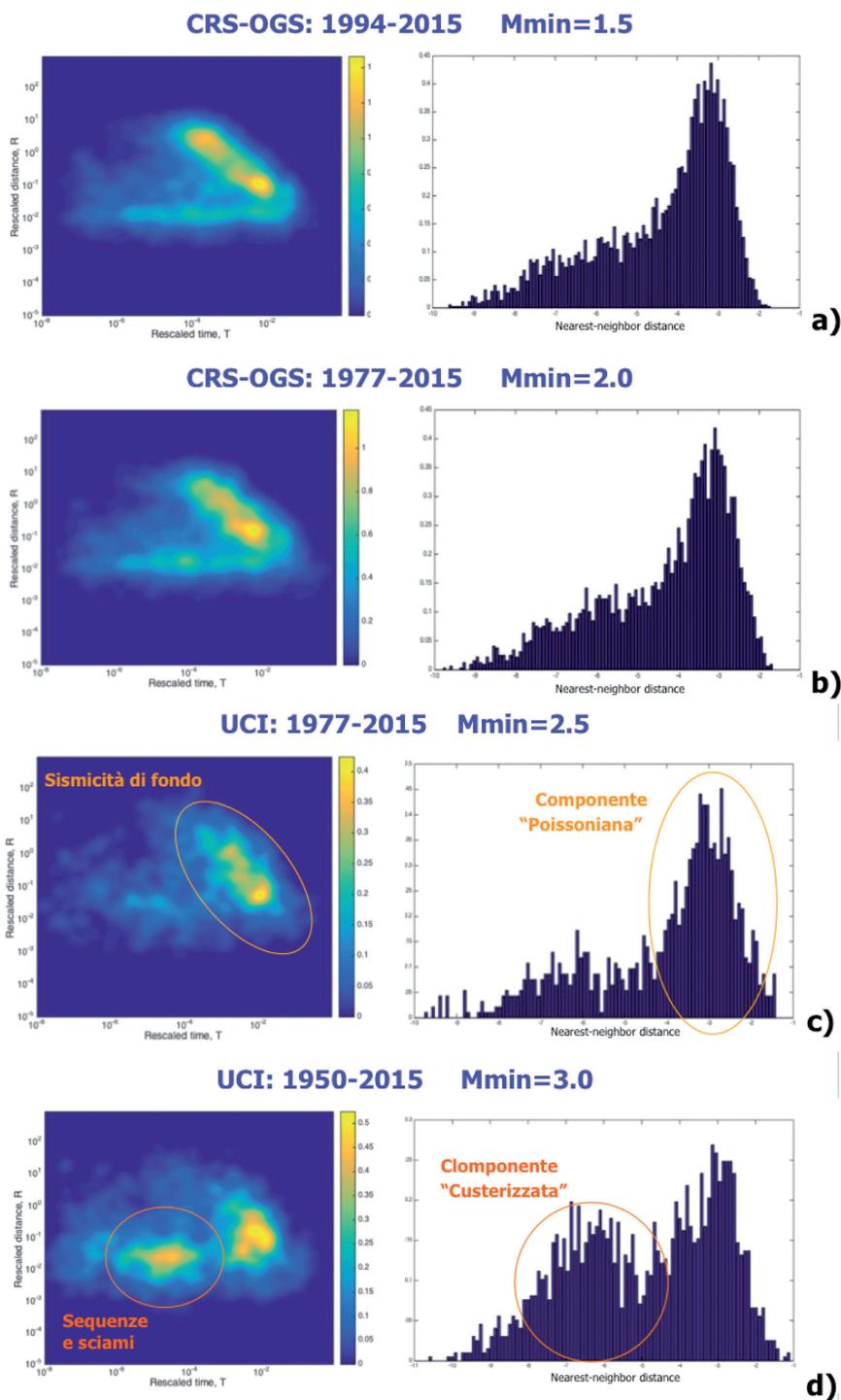


Fig. 2 – Distribuzione delle distanze “nearest-neighbor” fra eventi sismici, $\eta=TR$ (destra), e loro rappresentazione nel piano (T,R) dello spazio e tempo riscalati (sinistra), ottenute utilizzando: a,b) i dati CRS-OGS rivisti e c,d) il catalogo UCI (Peresan *et al.*, 2001), aggiornati fino al 2015. Per ciascuna finestra temporale analizzata sono stati considerati gli eventi con magnitudo $M \geq M_{min}$ corrispondente alla soglia di completezza. I parametri di scala utilizzati sono: b-value=0.9 e dimensione frattale $d=1.1$.

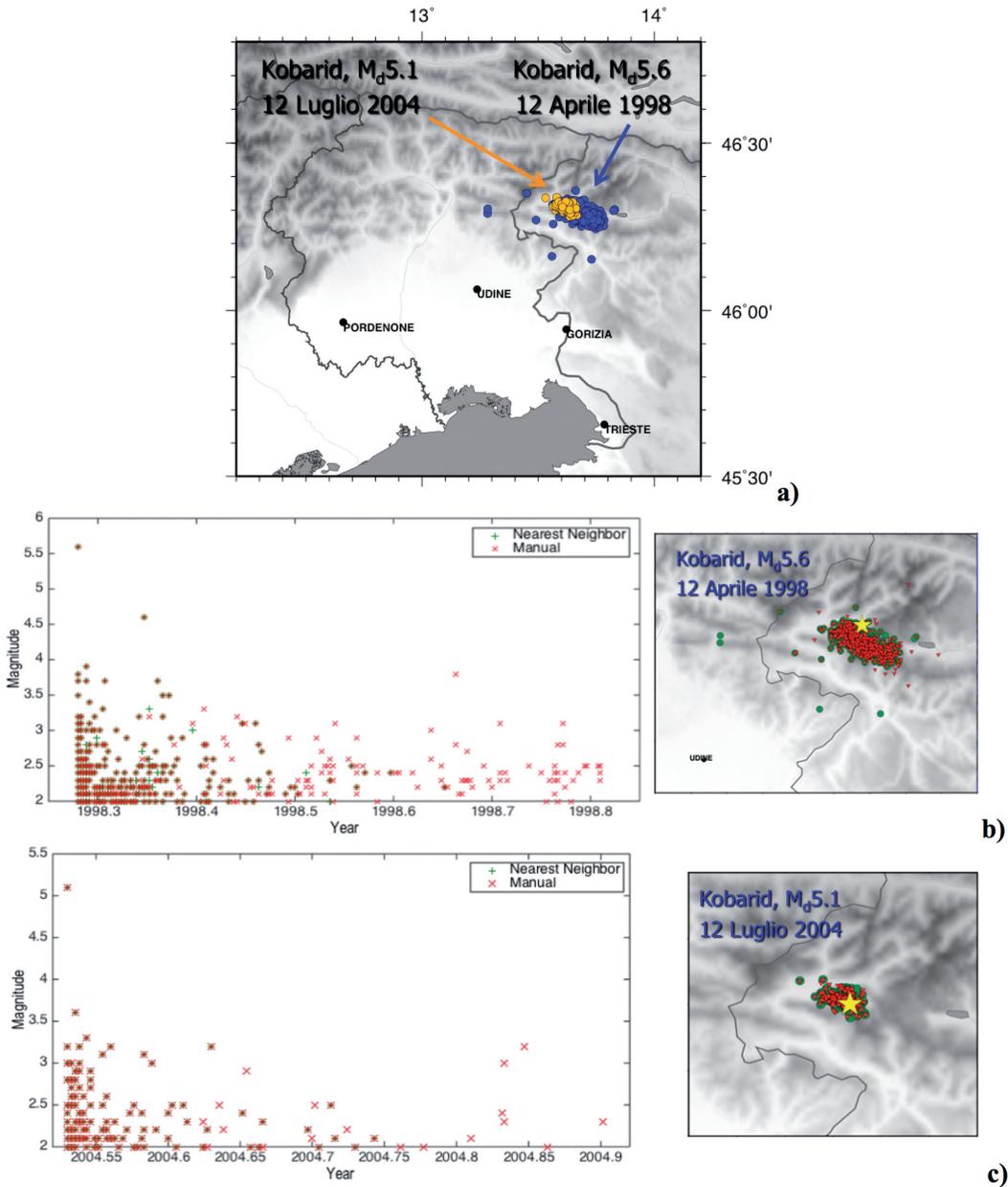


Fig. 3 – a) Mappa delle sequenze sismiche associate ai terremoti di Kobarid del 1998 (blu) e del 2004 (arancio), estratte con il metodo dei “nearest-neighbor” e confronto (b, c) fra le sequenze automaticamente identificate in questo studio (in verde) e le sequenze manualmente selezionate (in rosso) per i medesimi terremoti da Gentili and Bressan (2008). Le stelle gialle rappresentano gli epicentri degli eventi principali. Le sequenze automatiche sono state estratte dal catalogo CRS-OGS con i seguenti criteri: intervallo temporale: 1977-2015, $M_{min}=2.0$, Parametri di scala: $b=0.9$ e $d=1.1$; distanza di soglia $\eta=5$.

da quella *poissoniana* (i.e. separa le sequenze dalla sismicità di background), risulta tuttavia importante per una adeguata estrazione delle sequenze.

Al fine di verificare in modo più specifico l’attendibilità dei risultati forniti da questo nuovo approccio fisico-statistico per l’estrazione delle sequenze sismiche, è stata effettuata una analisi comparativa fra le sequenze di repliche identificate con il metodo dei *nearest-neighbours* e le

repliche selezionate manualmente, nell'ambito di una analisi di dettaglio effettuata da Gentili e Bressan (2008) per i più forti terremoti riportati nel catalogo CRS-OGS dal 1977 in poi. L'analisi comparativa ha evidenziato che:

- le sequenze di *aftershocks* automaticamente estratte (e.g. Fig. 3a) sono stabili, rispetto all'intervallo temporale ed alla soglia di magnitudo minima considerati per l'analisi;
- qualora si utilizzino appropriati parametri di scala, come quelli stimati applicando la USLE ai dati CRS-OGS, le sequenze di *aftershocks* automaticamente identificate con il metodo dei *nearest-neighbours* risultano ben confrontabili con quelle estratte manualmente, sia in termini di estensione spaziale, che di durata temporale (Fig. 3b e 3c).

Queste osservazioni supportano l'adeguatezza della metodologia considerata e della sua applicazione alla sismicità dell'Italia nord-orientale, permettendo di generalizzare la selezione delle sequenze sismiche e di caratterizzarne le proprietà spatio-temporali. Trattandosi di un approccio "*data-driven*", il metodo dei *nearest-neighbours* risulta molto più flessibile ed adeguato ai dati analizzati rispetto ai tradizionali modelli, inclusi i modelli di tipo ETAS, molto diffusi in letteratura e talvolta utilizzati per effettuare previsioni di tipo probabilistico (e.g. Rundle *et al.*, 2011). Tali modelli, tuttavia, prevedono la presenza di una significativa componente *clusterizzata* che, come abbiamo evidenziato, è insufficientemente rappresentata nei dati analizzati a partire dal 1977. In alternativa è necessario considerare una finestra spatio-temporale sufficientemente ampia, tale da incrementare sostanzialmente il numero di forti terremoti e dei relativi *cluster*; quest'ultima opzione rende tuttavia necessario fare ricorso a dati di qualità significativamente più bassa (cataloghi nazionali o globali), aumentando l'incertezza sui risultati dell'analisi.

L'analisi col metodo *nearest-neighbours* permette di evidenziare non solo gli aftershock dell'evento principale, ma anche gli aftershock degli aftershock stessi (*aftershocks* a livelli subordinati). Un'analisi statistica delle caratteristiche dei *cluster* identificati ha permesso di evidenziare, in via preliminare, una interessante correlazione fra la complessità topologica delle sequenze sismiche (cioè il massimo numero di livelli subordinati raggiunto dagli *aftershocks* in ciascuna sequenza) e le principali caratteristiche tettoniche e strutturali dell'area in esame. La complessità, infatti, non risulta dipendente dal numero di repliche che compongono la sequenza, né dalla magnitudo dell'evento principale, ma piuttosto dalla sua localizzazione spaziale. L'analisi di dettaglio della correlazione fra le caratteristiche delle sequenze sismiche e la tettonica regionale è oggetto di ulteriori approfondimenti.

Riconoscimenti. Si ringraziano A. Nekrasova e G. Rossi per la collaborazione nella stima dei parametri di scala (b-value e dimensione frattale) e lo staff del CRS-OGS per i dati utilizzati. Questa ricerca è stata finanziata dalla Protezione Civile della Regione Friuli Venezia Giulia.

Bibliografia

- Baiesi, M and M. Paczusi (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Phys. Rev. E*, 69, 066106.
- Gentili, S., M. Sukan, L. Peruzza, D. Schorlemmer (2011). Probabilistic completeness assessment of the past 30 years of seismic monitoring in northeastern Italy, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, V 186, Issues 1–2, Pages 81–96.
- Gentili, S., Bressan, G., (2008). The partitioning of radiated energy and the largest aftershock of seismic sequences occurred in the northeastern Italy and western Slovenia. *J. Seismol.* 12, 343–354.
- Grassberger P. (1983). Generalized dimensions of strange attractors. *Phys Lett* 97A: 227-230
- Gutenberg B. and C.F. Richter (1954). *Seismicity of the Earth*, 2nd edn., (Princeton University Press, 1954, Princeton).
- Kossobokov, V.G. and S.A. Mazhenkov (1988). Spatial characteristics of similarity for earthquake sequences: Fractality of seismicity. *Lecture Notes, Workshop on Global Geophysical Informatics with Applications to Research in Earthquake Prediction and Reduction of Seismic Risk* (15 Nov-16 Dec., 1988), ICTP, Trieste, 15 p.
- Kossobokov, V.G. and A. Nekrasova (2004). Unified scaling law for earthquakes: global map of parameters. In: *Analysis of geodynamical and seismic processes*. Moscow: Geos, p. 160-175 (*Computational Seismology* 35, in Russian).
- ISC (2015). International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom.

- Nekrasova A., V. Kossobokov, A. Peresan, A. Aoudia, G.F. Panza (2011). A Multiscale Application of the Unified Scaling Law for Earthquakes in the Central Mediterranean area and Alpine region. *Pure and Applied Geophysics, Special Issue on "Advanced seismic hazard assessments"*. Vol. 168 (1-2). DOI 10.1007/s00024-010-0163-4.
- Nekrasova A., Peresan A., Magrin A., Kossobokov V. (2016). The Unified Scaling Law for Earthquakes in the Friuli Venezia Giulia Region. *Geophys. Res. Abstracts*. Vol. 18, EGU2016-17706.
- Peresan A. and Panza G.F. (2002): UCI2001: the updated catalog of Italy. ICTP, Trieste, Italy, Internal report, IC/IR/2002/3.
- Peruzza L., M. Garbin, A. Snidarci, M. Suga, S. Urban, G. Renner and M.A. Romano (2015). Quarry blasts, underwater explosions and other dubious seismic events in NE Italy from 1977 till 2013. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 56, 4, 437-459.
- Romashkova L., A. Peresan, A. Nekrasova (2009). "Analysis of Earthquake Catalogues for CSEP Testing Region Italy". The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. ICTP, Miramare, Trieste. Italy. Internal report IC/IR/2009/006
- Rossi G. (1990) Fractal dimension time variations in the Friuli (northeastern Italy) seismic area. *Boll Geof Teor Appl* 32: 175-184
- Romashkova, L. and A. Peresan (2013). Analysis of Italian earthquake catalogs in the context of intermediate-term prediction problem" *Acta Geophysica*, vol. 61 (3), 583-610. DOI: 10.2478/s11600-012-0085-x
- Rundle JB, Holliday JR, Yoder M, Sachs MK, Donnellan A, Turcotte, DL, Tiampo KF, Klein W, Kellogg LH (2011). Earthquake precursors: activation or quiescence? *Geophys J Int* 187:225–236
- Zaliapin, I., A. Gabrielov, H. Wong, and V. Keilis-Borok (2008). Clustering analysis of seismicity and aftershock identification, *Phys. Rev. Lett.*, 101.
- Zaliapin, I. and Y. Ben-Zion (2013). Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *J. Geophys. Res.*, 118(6), 2847-2864, doi:10.1002/jgrb.50179.