

UN APPROCCIO ALLA MODELLAZIONE SPAZIALE DEGLI EFFETTI SISTEMATICI DI SITO E PERCORSO PER LA PRODUZIONE DI SCENARI DI SCUOTIMENTO

S. Sgobba¹, F. Lentoni², G. Lanzano¹, F. Pacor¹, A. Menafoglio²

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Milano, Italy

² MOX, Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Italy

La generazione di campi di scuotimento sismico relativi ad un dato *scenario* (espresso in termini di magnitudo e distanza sorgente-sito) è un argomento di crescente interesse per le compagnie di riassicurazione e nella pianificazione delle azioni di protezione civile. In questi ambiti, infatti, la predizione dei campi di moto è utile a definire l'input sismico in un determinato sito per stimare le perdite socio-economiche o per valutare il rischio sismico di strutture e infrastrutture. Tradizionalmente, la produzione di mappe di scuotimento si basa su tecniche di interpolazione spaziale che stimano i parametri di interesse (Misure di Intensità del moto sismico, MI) in siti in cui mancano osservazioni dirette, partendo da dati puntuali disponibili in corrispondenza delle stazioni di misura. I parametri MI sono generalmente di natura spazio-dipendente, essendo caratterizzati da un certo grado di "similarità" tra i percorsi sorgente-sito delle onde sismiche e dalla distanza dalla faglia. Pertanto, il ricorso a modelli geostatistici, capaci di caratterizzare la variabilità spaziale, è utile a ricostruire la distribuzione dello scuotimento in un dato dominio.

La correlazione spaziale delle MI è stata modellata empiricamente in precedenti studi (e.g. di Park *et al.* 2007, Wang e Takada 2005, Goda e Hong 2008, Bradley, 2014, tra gli altri), al fine di simulare campi casuali (*scenario*-dipendenti) del moto sismico. Questi metodi si basano sul principio che le MI spazialmente correlate possono essere generate da una distribuzione di residui intra-evento indipendenti e dalla loro matrice di covarianza (Park *et al.*, 2007). Lo studio della dipendenza spaziale dei soli residui intra-evento rappresenta un approccio di tipo *ergodico* al trattamento dell'incertezza, in cui la variabilità spaziale in molti siti è assunta essere identica alla variabilità nel tempo in un singolo sito (Anderson and Brune, 1999). Tuttavia, quando si dispone di osservazioni empiriche (registrazioni strong-motion), questa ipotesi può essere superata a favore di approcci *non-ergodici*, attraverso la stima dei termini ripetibili della variabilità dovuti ad effetti sistematici legati alla regione sorgente, al sito ed al percorso.

Allo scopo di valutare la dipendenza spaziale di tali effetti e di sfruttarla nella correzione delle stime di predizione mediana dei modelli di attenuazione, in questo lavoro proponiamo un nuovo approccio alla generazione di campi di scuotimento in termini di accelerazione spettrale, basato sulla correlazione spaziale della somma dei termini ripetibili della variabilità e della componente di incertezza aleatoria residua. Nello specifico, i termini di sito $\delta S2S_s$, di percorso $\delta P2P_{sr}$ e di regione $\delta L2L_r$ (in cui i pedici s ed r si riferiscono rispettivamente al sito ed alla regione-sorgente), sono determinati dalla decomposizione dei residui totali, rilassando l'ipotesi di ergodicità (Lin *et al.*, 2011; Rodriguez-Marek, 2013; Baltay *et al.*, 2017).

La somma dei suddetti termini (da qui in avanti chiamata con il termine “correttivo”) è analizzata e modellata spazialmente al fine di mappare gli effetti sistematici nell'area di interesse. L'identificazione di tali contributi si associa ad una riduzione della variabilità totale del modello di attenuazione che, nell'approccio non ergodico, viene definita dalla deviazione standard del residuo corretto dei termini ripetibili (da qui in avanti chiamata “sigma”). Anche la sigma è modellata spazialmente come variabile deterministica, al fine di ottenerne una previsione spazio-dipendente da utilizzare nel calcolo dell'incertezza associata ai campi di scuotimento simulati.

L'analisi è possibile in virtù della disponibilità di un gran numero di dati in una delle aree italiane più densamente campionate in termini di registrazioni con condizioni di sito pressoché omogenee (Pianura Padana). L'indagine delle proprietà di distribuzione spaziale del termine correttivo e la successiva modellizzazione della correlazione spaziale è condotta mediante alcuni strumenti tradizionali dell'analisi geostatistica (variogrammi), funzionali all'applicazione delle tecniche di interpolazione e simulazione spaziale più diffuse (Kriging e simulazione Gaussiana condizionata).

Il caso-studio. L'approccio proposto è applicato su un'area test in Pianura Padana, comprendente gli epicentri delle sequenze sismiche del 2012 in Emilia (M_w 6.1, 20/05/2012 Emilia 1° evento principale e M_w 6.0, 29/05/2012 Emilia 2° evento principale). Entrambi gli eventi selezionati rientrano nella zona sismogenetica ZS9-912 della mappa di pericolosità sismica nazionale MPS04 (Meletti *et al.*, 2008). In dettaglio, l'area di studio è definita nell'intervallo di latitudine 44,6°-45,1°N (equivalente a 55,6 km) e di longitudine 10,6°-11,8° E (equivalente a 95 km).

Il dataset assunto in questo studio è rappresentato da un sottoinsieme dei termini sistematici calcolati da Lanzano *et al.* (2017) per il Nord Italia rispetto ad un'equazione predittiva per la componente orizzontale (media geometrica) del picco di accelerazione PGA e delle accelerazioni spettrali (5% di smorzamento) nell'intervallo di periodi T [0.01-4s], specifica per la regione (NI15; Lanzano *et al.*, 2016). Questo sottoinsieme di dati si riferisce ad una selezione di oltre 2200 registrazioni (fornite dalle banche dati ESM “Engineering Strong-Motion” ed ITACA “ITalian ACcelerometric Archive”; Luzi *et al.*, 2016; Pacor *et al.*, 2011) e 71 stazioni accelerometriche situate all'interno del bacino del Po. Lanzano *et al.* (2016) ha raggruppato queste stazioni in un'unica classe di sito C1, introdotta per tener conto sia delle caratteristiche del suolo (categoria di suolo “C”, secondo la classificazione Eurocodice 8 - EC8; CEN, 2003, definita da valori della velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri compresi tra 180 e 360 m/s), e dei possibili effetti di bacino. Le stazioni hanno registrato i due eventi principali del 2012 dell'Emilia e sono caratterizzate da distanze di separazione variabili fino a 100 km, al fine di vincolare il modello di correlazione soprattutto ai periodi più lunghi.

Analisi della variabilità spaziale e metodo di interpolazione. L'analisi geostatistica è condotta a partire dai risultati dell'analisi dei residui per la stima del correttivo e della sigma in funzione del periodo. Lo sviluppo del metodo ha previsto le seguenti fasi:

1. Analisi esplorativa delle caratteristiche di distribuzione spaziale dei termini correttivi e della sigma sull'area investigata: in questa fase sono state indagate e verificate le ipotesi di stazionarietà ed isotropia della distribuzione dei dati;
2. Identificazione della struttura di correlazione spaziale dei termini correttivi e di sigma

- selezionando il variogramma più appropriato tra i modelli esponenziale, sferico e gaussiano (Cressie, 1993) attraverso una procedura di cross-validazione;
3. Applicazione della tecnica di interpolazione spaziale univariata di Kriging e di simulazione Gaussiana condizionata come predittori per stimare il valore dei correttivi e di sigma alle diverse ordinate spettrali;
 4. Simulazione di campi di scuotimento per la generazione di realizzazioni equiprobabili del moto del terreno inclusivi della variabilità spaziale aleatoria.

L'analisi esplorativa della distribuzione spaziale dei correttivi condotta nell'area studio evidenzia un comportamento differenziato tra dati relativi al corto ed al lungo periodo. In particolare, i dati corrispondenti alla PGA risultano caratterizzati da un trend costante (validando così l'ipotesi di stazionarietà) e da isotropia. Al contrario, i periodi più lunghi ($T=4s$) sono associati a un trend spaziale nei correttivi positivi, distribuiti in direzione EW, lungo gli Appennini settentrionali, e raccordati perpendicolarmente al sistema di faglie principali in corrispondenza della dorsale di Mirandola. Tale pattern spaziale supporta la formulazione di un modello non-stazionario per il lungo periodo, e l'introduzione di un termine di trend (stimato tramite un'analisi di regressione ai minimi quadrati) per descrivere la distribuzione dei dati lungo le direzioni preferenziali osservate.

La rimanente componente di variabilità attorno alla media è modellata con un processo stocastico stazionario, adottando la funzione di variogramma esponenziale. La predizione dei termini correttivi e di sigma, su tutti i punti della griglia spaziale di riferimento, è ottenuta sia applicando la tecnica di Kriging, sia con la tecnica della simulazione condizionata. In entrambi i casi, i risultati delle correlazioni spaziali dei correttivi sono sommati alla predizione del modello NI15 per lo scenario di riferimento e utilizzati per generare realizzazioni casuali dei campi di scuotimento. Le stime e le simulazioni fornite incorporano inoltre gli effetti dell'incertezza locale associata alla predizione ed il contributo spazio-dipendente della variabilità aleatoria corretta per il sito ed il percorso. L'efficacia di predizione delle mappe di scuotimento prodotte è valutata sia con la tecnica della cross-validazione, sia verificando le stime su eventi indipendenti dal dataset di calibrazione.

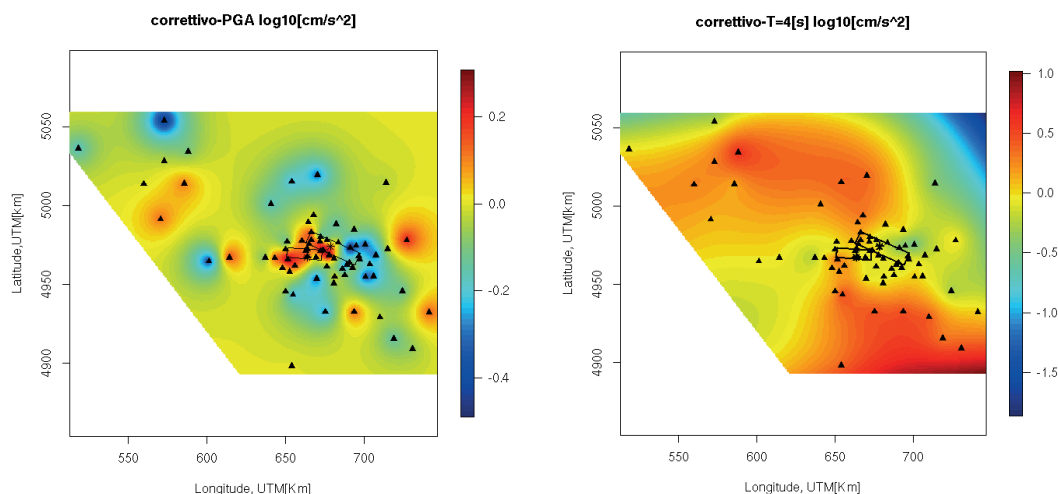


Fig 1 - Esempi di predizione spaziale dei termini correttivi stimati mediante Kriging (in scala logaritmica decimale), corrispondenti alla PGA (a sinistra) e periodo $T=4.0$ s (a destra). I triangoli indicano le stazioni di registrazione. I rettangoli rappresentano la proiezione in superficie dei piani di faglia dei due eventi principali del 20/5/2012 e del 29/5/2012. Le localizzazioni epicentrali dei due eventi sono indicate dagli asterischi neri.

Risultati

- La struttura di correlazione spaziale nella pianura padana mostra che i termini correttivi sono caratterizzati da distanze di correlazione (*range* del variogramma) che aumentano con l'aumentare del periodo (circa 30 km per la PGA e 100 km a $T=4s$), coerentemente con i risultati della letteratura;
- L'esame delle mappe di predizione dei correttivi mostra la presenza di effetti di amplificazione del moto perpendicolarmente alla proiezione superficiale delle due faglie generatrici degli eventi principali dell'Emilia. Tale area si allunga nella direzione Nord-Sud (NS) con l'aumentare del periodo. Questo effetto sistematico potrebbe essere collegato alla struttura geomorfologica al di sotto della regione ed al percorso di propagazione delle onde superficiali all'interno del bacino del Po; entrambi fenomeni che non possono essere colti dalla classificazione semplificata dei siti considerati dal modello di riferimento, come confermato da alcuni studi (ad es., Paolucci *et al.*, 2015);
- Il modello di correlazione proposto è valido per l'intera zona sismogenetica generatrice della sequenza emiliana del 2012, e non tiene quindi conto di peculiarità specifiche del moto legate ai singoli eventi. La mappa dei correttivi è infatti rappresentativa dell'effetto medio di diversi eventi nella zona sismogenetica ZS9-912 (sebbene dominata dalla sequenza emiliana del 2012) della mappa MPS04 e diversi effetti di direttività rispetto alle sorgenti sismogenetiche;
- L'approccio proposto per generare campi di scuotimento del terreno può essere considerato una valida alternativa da utilizzare per la stima delle perdite e la valutazione del rischio sismico in aree densamente campionate, per le quali una mappa dei termini correttivi può essere definita *a priori* ed aggiornata man mano che nuovi dati nella regione si rendono disponibili.

Bibliografia

- Anderson, J.G., and J.N. Brune; 1999: Probabilistic seismic hazard assessment without the ergodic assumption. *Seismological Research Letters*, 70:19–28.
- Baltay, A.S., T.C. Hanks, and N. Abrahamson; 2017: Uncertainty, variability, and earthquake physics in ground-motion prediction equations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 107, no. 4, 1754–1772.
- Bradley, B.A.; 2014: Site-specific and spatially-distributed ground-motion intensity estimation in the 2010-2011 Canterbury earthquakes. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 61–62, 83–91.
- CEN, European Committee for Standardisation TC250/SC8; 2003, Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 1.1: General rules, seismic actions and rules for buildings, PrEN1998-1.
- Cressie, N.; 1993: *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, New York.
- Goda, K. and H.P. Hong; 2008: Spatial correlation of peak ground motions and response spectra. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, 354–365.
- Lanzano, G., M. D'Amico, C. Felicetta, R. Puglia, L. Luzi, F. Pacor, and D. Bindi; 2016: Ground motion prediction equations for region specific probabilistic seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(1): 73–92.
- Lanzano, G., F. Pacor, L. Luzi, M. D'Amico, R. Puglia, and C. Felicetta; 2017: Systematic source, path and site effects on ground motion variability: the case study of Northern Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(11):4563–4583.
- Lin, P.S., B. Chiou, N. Abrahamson, M. Walling, C.T. Lee, and C.T. Cheng; 2011: Repeatable source, site, and path effects on the standard deviation for empirical ground-motion prediction models. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 2281–2295.
- Luzi, L., R. Puglia, E. Russo, M. D'Amico, C. Felicetta, F. Pacor, G. Lanzano, U. Ceken, J. Clinton, G. Costa, et al. (2016). The Engineering strong-motion database: a platform to access Pan-European accelerometric data. *Seismological Research Letters*, 87(4): 987–997.
- Meletti, C., F. Galadini, G. Valensise, M. Stucchi, R. Basili, S. Barba, G. Vannucci, and E. Boschi; 2008: A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*, 450(1): 85–108.
- Pacor, F., R. Paolucci, L. Luzi, F. Sabetta, A. Spinelli, A. Gorini, M. Nicoletti, S. Marcucci, L. Filippi, and M. Dolce (2011a). Overview of the Italian strong motion database ITACA 1.0. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6): 1723–1739.
- Paolucci, R., I. Mazzieri, and C. Smerzini; 2015: Anatomy of strong ground motion: near-source records and 3D physics-based numerical simulations of the Mw 6.0 May 29 2012 Po Plain earthquake, Italy, *Geophys. J. Int.* 203, 2001–2020.

- Park, J., P. Bazzurro, and J.W. Baker; 2007: Modeling spatial correlation of ground motion Intensity Measures for regional seismic hazard and portfolio loss estimation. *Appl. Stat. Probab. Civ. Eng.* 1–8.
- Rodriguez-Marek, A., F. Cotton, N. A. Abrahamson, S. Akkar, L. Al Atik, B. Edwards, G. A. Montalva, and H. Dawood; 2013: A model for single-station standard deviation using data from various tectonic regions, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 103, 3149–3163
- Wang, M. and T. Takada; 2005: Macrospatial correlation model of seismic ground motions. *Earthq. Spectra* 21, 1137–1156.