

un'amplificazione ad alte frequenze, rispettivamente ai valori di 17 e 25 Hz.

Infine, il confronto tra i valori osservati dell'accelerazione orizzontale di picco, per l'evento di mainshock $M_w=6.3$, con quelli computati mediante analisi numerica 2D, per le stazioni presenti lungo lo stendimento RAN, ha mostrato una buona corrispondenza. In particolare, la modellazione ha fornito il valore di circa $1g$ in prossimità della stazione AQM, il cui strumento andò in saturazione, mediante l'ubicazione dell'interfaccia carbonati-torbidi a circa 90 metri di profondità, desunta dal picco osservato del rapporto di amplificazione intorno a 3.5 Hz.

Anche il confronto tra i rapporti spettrali osservati, per gli eventi con magnitudo tra 4.1 e 5.6, e quelli numerici, per l'evento di mainshock, ha presentato un buon accordo in corrispondenza dei picchi osservati alle frequenze fondamentali.

In modo da ulteriormente migliorare la comprensione degli effetti di sito nell'alta Valle del Fiume Aterno, l'analisi dei dati sperimentali di "weak motion" e la modellazione non lineare dinamica 2D, con l'utilizzo degli altri eventi della sequenza del 2009 come terremoti di "input", sono attualmente l'oggetto di un progetto di ricerca sperimentale e numerica.

Bibliografia

- Amoroso S., Del Monaco F., Di Eusebio F., Monaco P., Taddei B., Tallini M., Totani F. and Totani G.; 2010: Campagna di indagini geologiche, geotecniche e geofisiche per lo studio della risposta sismica locale della città dell'Aquila: la stratigrafia dei sondaggi (giugno-agosto 2010). Report CERFIS n. 1. http://www.cerfis.it/en/download/cat_view/67-pubblicazioni-cerfis/68-reports.
- Blumetti A.M., Cavinato G.P. and Tallini M.; 1996: Evoluzione Plio-Quaternaria della conca di L'Aquila-Scoppito: Studio Preliminare. *Il Quaternario*, 9, 281-286.
- Bongiovanni G., Gorini A., Gorelli V., Marcucci S., Marsan P. and Milana G.; 1995: Primi risultati della rete accelerometrica locale dell'Aquila e sistema di monitoraggio del Sacro Convento di Assisi. Rapporto tecnico SSN/RT/95/6, 5-19.
- Cavinato G.P., Cosentino D., De Rita D., Funicello R. and Parotto M.; 1994: Tectonic-sedimentary evolution of intrapenninic basins and correlation with the volcano-tectonic activity in central Italy. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 49, 63-76.
- INGV: <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>
- Lanzo G. and Pagliaroli A.; 2012; Seismic site effects at near-fault strong-motion stations along the Aterno River Valley during the $M_w=6.3$ 2009 L'Aquila earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 40, 1-14.
- Lanzo G., Tallini M., Milana G., Di Capua G., Del Monaco F., Pagliaroli A. and Peppoloni S.; 2011: The Aterno Valley strong-motion array: seismic characterization and determination of subsoil model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1855-1875.
- Sabetta F., Rovelli A., Celebi M. and Rinaldis D.; 2009: Sequenza sismica dell'Abruzzo: analisi delle registrazioni accelerometriche. *Energia, Ambiente e Innovazione* 3/2009.
- Tallini M., Lorè A., Reale E., Scozzafava M. and Magaldi D.; 2002: Geologia del Quaternario e Pianificazione territoriale della piana intramontana L'Aquila-Scoppito (Italia centrale). *GEAM, Geingegneria ambientale e mineraria*, 39, 55-67.
- Vezzani L. and Ghisetti F.; 1998: Carta geologica dell'Abruzzo (Scala 1:100.000). S.EL.CA., Firenze.
- Working Group MS-AQ; 2010: Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo -Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.

SELEZIONE DELL'INPUT PER SIMULAZIONI NUMERICHE AI FINI DELLA MICROZONAZIONE SISMICA

F. Sabetta¹, G. Naso¹ e A. Pagliaroli²

¹ Dipartimento della Protezione Civile

² CNR - IGAG

La definizione e la selezione del moto di input costituisce uno degli elementi fondamentali per la valutazione dell'amplificazione del moto del suolo attraverso simulazioni numeriche. Nella modellazione degli effetti locali il moto di riferimento è in genere riferito a condizioni di suolo rigido affiorante e in assenza di effetti topografici, come nel caso dei risultati degli studi di pericolosità di base. L'ampiezza e il contenuto in frequenza del moto di input dipendono essenzialmente da:

- caratteristiche del meccanismo della sorgente sismica (es. tipo e lunghezza della faglia);
- magnitudo;
- caratteristiche fisico-meccaniche della traiettoria sorgente-sito percorsa dalle onde sismiche.

In generale i periodi fondamentali e la durata del moto aumentano all'aumentare della magnitudo e della distanza epicentrale, mentre l'ampiezza massima diminuisce allontanandosi dalla

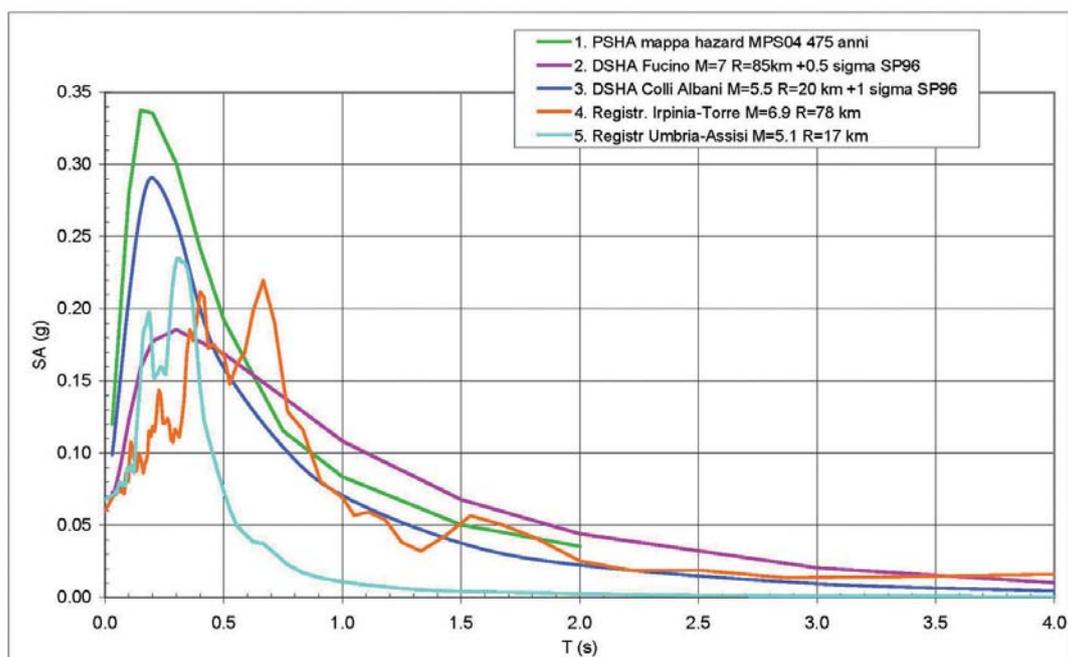


Fig. 1 - Spettri di risposta su suolo rigido selezionati per la microzonazione dell'area archeologica centrale di Roma.

sorgente per effetto dell'attenuazione geometrica e anelastica. Il moto di input che si utilizza nelle analisi numeriche può essere espresso sia sotto forma di accelerogramma, sia di spettro di risposta elastico.

In letteratura vengono proposti diversi approcci per la selezione del moto di input ai fini della valutazione dell'amplificazione del moto del suolo (Iervolino *et al.*, 2011; Pagliaroli e Lanzo, 2008; Gruppo di lavoro MS, 2008; Bommer e Acevedo, 2004; NERHP, 2003; Krinitzsky, 2002; Monachesi *et al.*, 2000) ma manca una indicazione chiara circa la metodologia da adottare. Un tentativo in questa direzione si può trovare in un recente lavoro in corso di pubblicazione (Sabetta, 2012) dove si coniugano due diversi approcci (probabilistico e deterministico) per la selezione dell'input sismico per l'area archeologica di Roma.

Nei primi anni di applicazione di studi di pericolosità sismica si utilizzava in prevalenza il metodo indicato come "Deterministic Seismic Hazard Assessment" (DSHA) che prevede la selezione di un terremoto di riferimento, scelto in base alla conoscenze sismotettoniche dell'area e che produce il massimo scuotimento al sito in esame calcolato attraverso l'impiego di una relazione di attenuazione. Il DSHA rappresenta un metodo diretto e conservativo, a seconda della frazione di deviazione standard della relazione di attenuazione che viene considerata, per la valutazione del moto del terreno al sito (ad es. spettro di risposta). IL DSHA ha tuttavia il limite di non fornire indicazioni sulla probabilità di accadimento del terremoto di riferimento e sull'effetto delle incertezze.

Negli ultimi 20-30 anni l'approccio deterministico è stato progressivamente sostituito dal "Probabilistic Seismic Hazard Assessment" (PSHA) che presenta il vantaggio di incorporare e quantificare le incertezze relative a localizzazione, magnitudo e tasso di occorrenza dei terremoti e soprattutto di fornire una stima della probabilità di eccedenza del moto del terreno che consente di incorporare direttamente il PSHA in stime di rischio sismico e di valutare i diversi livelli di accettabilità nel processo decisionale (Bommer e Abrahamson, 2006). Tuttavia il PSHA ha lo svantaggio di non fornire alcuna indicazione circa il terremoto di riferimento e le coppie magnitudo-distanza che permettono di definire lo scenario atteso in termini di scuotibilità e, conseguentemente, di danneggiamento, a fronte di un determinato evento sismico. In letteratura si ritrovano spesso

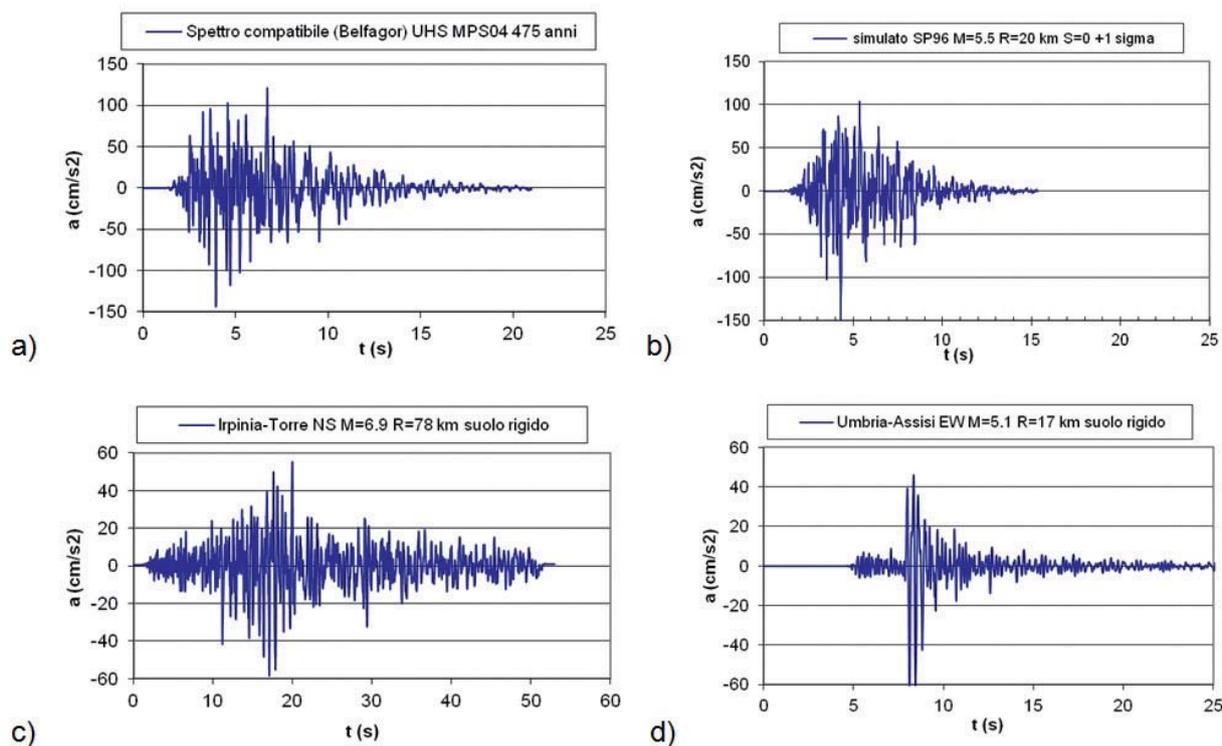


Fig. 2 - Accelerogrammi selezionati per la microzonazione dell'area archeologica di Roma: a) serie temporale compatibile con lo spettro UHS della mappa di hazard simulata col software Belfagor (Mucciarelli *et al.*, 2004); b) esempio di un accelerogramma simulato con la metodologia di Sabetta and Pugliese 1996 ($M=5.5$, $R=20$ km, suolo rigido) scalato con un fattore pari a una deviazione standard; c) accelerogramma registrato a Torre del Greco ($M=6.9$, $R=78$ km, suolo rigido) durante il terremoto dell'Irpinia 1980; d) accelerogramma registrato ad Assisi ($M=5.15$, $R=17$ km, suolo rigido) durante il terremoto dell'Umbria-Marche 1997.

accese discussioni tra i sostenitori del DSHA e del PSHA che tendono a presentarli come mutualmente esclusivi (Bommer, 2002). In realtà la dicotomia tra i due metodi non è così pronunciata come spesso si vuol fare apparire e l'approccio ideale alla definizione dell'input per analisi di sito dovrebbe coniugare i vantaggi di entrambi i metodi (McGuire, 1995). Probabilmente la scelta migliore è quella di utilizzare entrambi gli approcci integrati, come ad esempio nella tecnica della disaggregazione del PSHA (Bazzurro e Cornell, 1999).

Sulla scorta del dibattito brevemente sintetizzato e delle esperienze maturate recentemente negli ultimi terremoti italiani (L'Aquila 2009; Modena 2012) si propone quindi la seguente metodologia:

1. Selezione di spettri di risposta a pericolosità uniforme (UHS) su suolo rigido e con periodo di ritorno 475 anni ricavati dal PSHA e dalla normativa tecnica per il sito in esame.
2. Selezione di uno o più terremoti di riferimento (coppie magnitudo-distanza) in base a:
 - disaggregazione del PSHA
 - selezione dei principali terremoti storici e strumentali
 - analisi delle faglie attive e delle zone sismogenetiche circostanti il sito in esame.
3. Calcolo degli spettri di risposta su suolo rigido relativi ai terremoti di riferimento in base a una relazione di attenuazione.
4. Confronto e scelta degli spettri ricavati dall'approccio probabilistico e deterministico (punti 1 e 3).
5. Simulazione, ad es. col software BELFAGOR (Mucciarelli *et al.*, 2004), di accelerogrammi spettro-compatibili con gli spettri UHS.
6. Simulazione di accelerogrammi non stazionari (Sabetta e Pugliese, 1996) compatibili con gli spettri di riferimento di cui al punto 3 e sulla base delle coppie magnitudo-distanza individuate al punto 2.

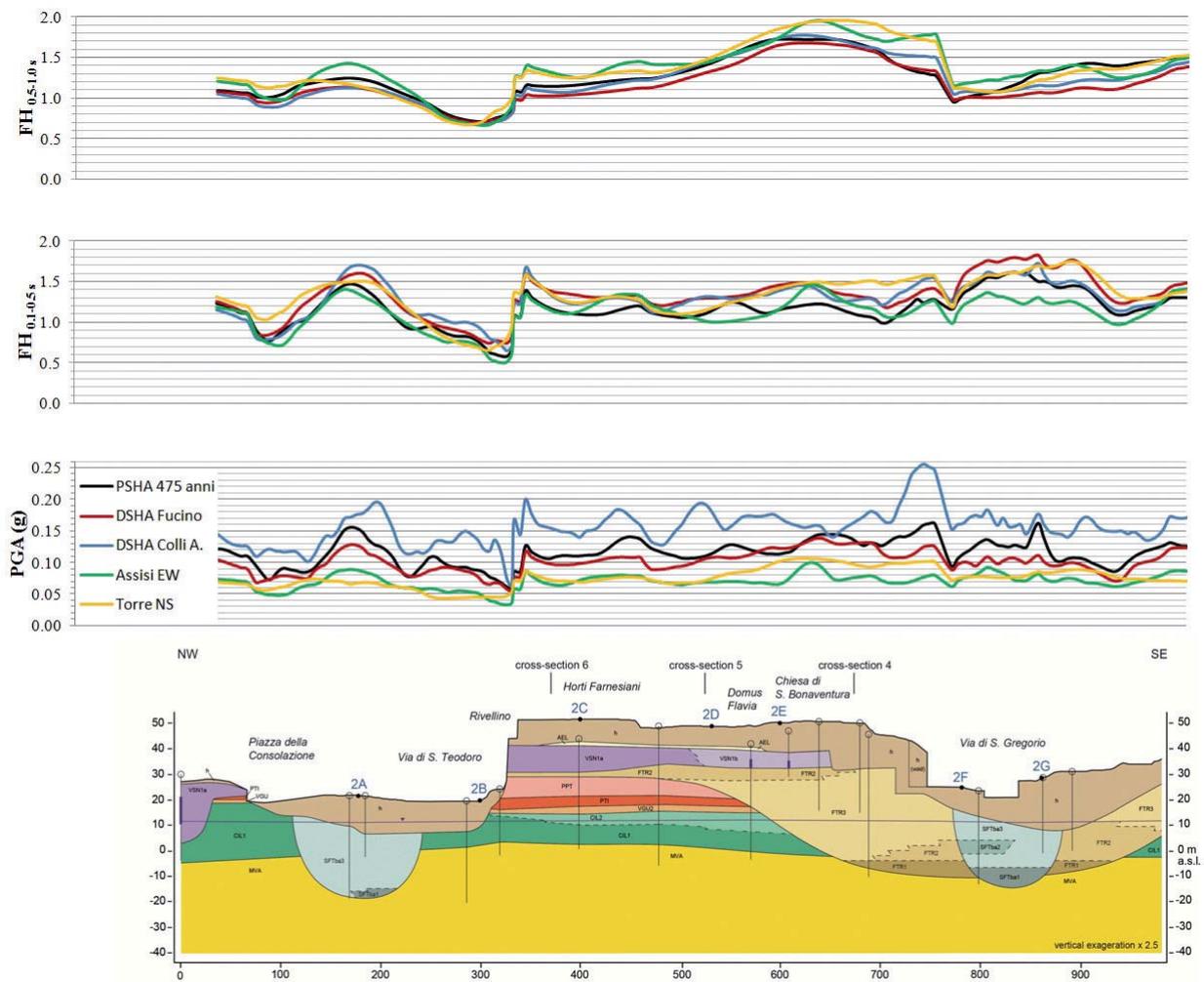


Fig. 3 - Profili della accelerazione di picco (PGA) e dei fattori di amplificazione in termini di intensità di Housner definiti negli intervalli 0.1-0.5 s (FH0.1-0.5s) e 0.5-1.0 s (FH0.5-1.0s), calcolati con analisi numeriche 2D alla superficie di una sezione NW-SE rappresentativa delle condizioni morfologiche e litostratigrafiche del colle Palatino e delle aree limitrofe. Come input sono stati utilizzati i cinque segnali selezionati in accordo alla metodologia proposta.

7. Selezione in banca dati di accelerogrammi registrati su suolo rigido e corrispondenti alle coppie magnitudo-distanza individuate al punto 2, utilizzando software tipo REXEL (Iervolino *et al.*, 2009).
8. Applicazione degli accelerogrammi selezionati all'interfaccia bedrock- terreni di copertura e valutazione dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche

In Fig. 1 viene riportato un esempio di spettri di risposta selezionati con la metodologia appena descritta e utilizzati per la definizione dell'input sismico nell'area archeologica di Roma (Sabetta, 2012). Lo spettro n.1 (approccio probabilistico) è ricavato dalla mappa di pericolosità MPS04 realizzata dall'INGV (Stucchi *et al.*, 2011) e utilizzata per la definizione degli spettri di progetto nella normativa italiana (Decreto, 2008). Gli spettri 2 e 3 (approccio deterministico) corrispondono ai terremoti di riferimento individuati per il centro storico di Roma e attenuati al sito con la relazione di Sabetta e Pugliese (1996) incrementata rispettivamente di 0.5 e 1 deviazione standard. Gli spettri 4 e 5 corrispondono ad accelerogrammi estratti dalla banca dati italiana ITACA (Luzi *et al.*, 2010) per condizioni di suolo rigido ed in corrispondenza delle coppie magnitudo-distanza individuate per i terremoti di riferimento.

In Fig. 2 sono riportati, sempre riferiti all'area archeologica di Roma, quattro degli

accelerogrammi selezionati in base a quanto discusso ai punti 5, 6 e 7 della metodologia proposta. I risultati di analisi numeriche 2D agli elementi finiti eseguite con tali accelerogrammi su una sezione rappresentativa delle condizioni morfologiche e litostratigrafiche del colle Palatino e delle aree limitrofe sono riportati in Fig. 3. Una descrizione dettagliata, sia dal punto di vista qualitativo sia quantitativo, dei fenomeni di amplificazione locale è riportata in Pagliaroli *et al.* (2011, 2012). In questa sede interessa sottolineare le differenze nei risultati dovute all'utilizzo dei differenti segnali. Se la variazione in termini di accelerazione di picco (PGA) è piuttosto marcata riflettendo le differenze in termini di PGA in ingresso al sito (Fig. 2), le differenze in termini di fattore di amplificazione appaiono contenute. In particolare, nel caso in esame, i fattori di amplificazione FH, definiti in termini di intensità di Housner calcolata in differenti campi di periodo (0.1-0.5s, 0.5-1.0s), mostrano differenze massime dell'ordine di 30-40% solo in zone limitate del profilo. La sostanziale similitudine tra i profili dei fattori di amplificazione relativi ai vari input può essere giustificata dal modesto grado di non linearità sperimentato dai terreni e dalle rocce tenere costituenti il sottosuolo dell'area in esame.

Le mappe di microzonazione di livello 3 per l'area archeologica sono state costruite sulla base dei valori di FH calcolati con riferimento all'input PSHA. Questo approccio infatti, come detto in precedenza, consente di costruire un spettro a pericolosità uniforme che combina una serie di terremoti che possono colpire l'area in esame. Tale approccio è ideale per uno studio di microzonazione sismica che ha finalità di pianificazione e prevenzione nei confronti di eventi di varia magnitudo e distanza che possono colpire il sito. Inoltre il riferimento ad un dato valore del tempo di ritorno consente di calcolare spettri di risposta direttamente utilizzabili nella progettazione di interventi di eventuali adeguamento sismico delle strutture.

Sulla base delle analisi comparative mostrate in Fig. 3, facendo tuttavia riferimento a terremoti di scenario di tipo deterministico, nonché a segnali naturali compatibili con le caratteristiche sismotettoniche dell'area, è lecito attendersi modeste differenze nella microzonazione sismica sia dal punto di vista qualitativo (delimitazione delle aree) sia quantitativo (amplificazione del moto sismico).

Ulteriori esempi di applicazione della metodologia proposta sono relativi al terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009 (ad es. AA.VV. 2010) e dell'Emilia-Romagna del 20 maggio 2012. La suddetta metodologia sembra prestarsi meglio di altre agli scopi ultimi della microzonazione sismica e più in generale alla mitigazione del rischio. Infatti l'approccio probabilistico tiene conto delle diverse magnitudo e distanze epicentrali degli eventi che possono colpire il sito in esame, mentre il confronto con scenari deterministici ed eventi naturali registrati, rassicura sull'effettiva possibilità che quel tipo di evento possa accadere. Analisi numeriche comparative, eseguite con i differenti input, consentono di valutarne qualitativamente e quantitativamente gli effetti sulle mappe di microzonazione sismica e di definire la rappresentatività di queste ultime nei confronti dei possibili scenari.

Bibliografia

- AA. VV.; 2010: Microzonazione sismica delle macroaree - Macroarea 4 (Barisciano, Castelnuovo, Poggio Pincenze, S. Pio delle Camere). In: Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010), Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo - Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom, Parte III, pp. 147-196.
- Bazzurro, P. e Cornell, C.A.; 1999: Disaggregation of seismic hazard. Bulletin of Seismological Society of America, 89, 2, 501-520.
- Bommer, J. J.; 2002: Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy. J. Earthquake Eng. 6 (special issue 1), 43-73.
- Bommer, J.J. and Acevedo, A.B.; 2004: The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. Journal of Earthquake Engineering, 8, 43 - 92.
- Bommer, J.J. and Abrahamson N.A.; 2006: Why Do Modern Probabilistic Seismic-Hazard Analyses Often Lead to Increased Hazard Estimates? Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 96, No. 6, pp. 1967-1977.
- Decreto; 2008: Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture: Norme Tecniche per le Costruzioni, GU n.29 del 04/02/2008.
- Gruppo di lavoro MS; 2008: Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3vol. e CD-Rom.
- Krinitzky, E. L.; 2002: How to obtain earthquake ground motions for engineering design. Eng. Geol. 65, 1-16.

- Iervolino I., Galasso C., Cosenza E.; 2009: REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:339-362. DOI 10.1007/s10518-009-9146-1.
- Iervolino I., Chioccarelli E., Convertito V.; 2011: Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 31(9): 1212–1231.
- Luzi L., Sabetta F., Mele F., Castello B.; 2010: Italian strong motion database relative to the period 1972-2004: motivations and aims. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol 8 n. 5 pp 1159-1174. DOI: 10.1007/s10518-009-9140-7
- McGuire, R.K.; 1995: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the loop. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 5, 1275-1284.
- Monachesi, G., Castelli, V., Coppari, H., Stucchi, M., Peruzza, L., Franceschina, G.L., Marcellini, A., Pagani, M., Priolo, E.; 2000: La microzonazione sismica di Fabriano. Sismicità di riferimento. A cura di A. Marcellini e P. Tiberi. Macerata
- Mucciarelli M., Spinelli A., Pacor F.; 2004: Un programma per la generazione di accelerogrammi sintetici “fisici” adeguati alla nuova normativa. 11° Congresso Nazionale l’Ingegneria Sismica in Italia, Genova 25-29 gennaio 2004.
- NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program); 2003: Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). Building seismic safety council national institute of building sciences. Washington, D.C.
- Pagliaroli A., Lanzo G.; 2008: Selection of real accelerograms for the seismic response analysis of the historical town of Nicastro (Southern Italy) during the March 1638 Calabria earthquake. *Engineering Structures*, 30, 2211-2222.
- Pagliaroli A., Moscatelli M., Stigliano F., Mancini M., Di Fiore V., Lanzo G., Piro S., Piscitelli S., Naso G., Castenetto S., Sabetta F., Petrangeli P., Cecchi R.; 2011: Microzonazione sismica dell’Area Archeologica Centrale di Roma. XIV Congresso Nazionale “L’Ingegneria Sismica in Italia”, ANIDIS, Bari, 18-22 settembre 2011, Digilabs, Bari, DVD, paper #4.
- Pagliaroli A., Quadrio B., Sanò T., Lanzo G.; 2012: Numerical modelling of site effects in the Palatine hill, Roman Forum and Coliseum archaeological area. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Special issue on “Seismic Microzonation of Palatine hill, Roman Forum and Coliseum Archaeological Area” (submitted).
- Sabetta, F. and Pugliese, A.; 1996: Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 337-352.
- Sabetta F.; 2012: Seismic hazard and design earthquakes for the central archaeological area of Rome. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Special issue on “Seismic Microzonation of Palatine hill, Roman Forum and Coliseum Archaeological Area” (submitted).
- Stucchi, M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G. M., Boschi E.; 2011: Seismic Hazard Assessment (2003–2009) for the Italian Building Code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 4, pp. 1885–1911, doi: 10.1785/0120100130.

ARCHING FOR REGIONAL AND SITE EFFECTS IN INTENSITY DATA SETS (ONE INTENSITY PER TOWN)

L. Sirovich¹, F. Pettenati¹ and P. Jamsek²

¹ Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, GEO Section, Trieste, Italy

² Geological Survey of Slovenia, Ljubljana, Slovenia

Previous experience. The literature offers many examples of intensities *I* distributed asymmetrically, at a regional scale, around the epicentre and/or around the projection of the fault-source. In case of pre-instrumental earthquakes, it is often impossible to understand whether these irregular regional patterns are due to the anisotropic radiation from the source and/or to the anisotropic propagation of energy in the Crust. There is a relatively widespread technique which attempts an interpretation of this; it consists of calculating the differences between the intensities observed in the sites and the corresponding values carried there by an isotropic ‘attenuation’ law (empirical decrement with distance) (see for example: Hauksson *et al.*, 2008; Hough and Avni, 2010). So doing, however, all local anomalies are implicitly attributed to the local characteristics of the sites, whilst possible influence of the radiation from the source, or of the Crust’s characteristics, is obscured. In our opinion, one should follow instead the reference cause-effect logic chain source-, path- and site-effects which obeys also the simplicity principle (so called Occam’s razor). In other words, jumping from the epicentre to the site effects without exploring what is in between, renders this widespread technique ill-posed. A thorough discussion on this, related to a M5.4 earthquake of 2008 in South Los Angeles is available in Hauksson *et al.* (2008) and in Sirovich *et al.* (2009).

Then, the literature offers many examples of true intensity amplifications related to town quarters in different geological conditions. For example, one of the present authors described a case history of small microzones, within towns and villages struck by the M6.9 23 November 1980