

STUDIO SISMOLOGICO PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA DI SITO AI FINI DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI ALCUNI COMUNI DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA

G. Laurenzano¹, E. Priolo¹, C. Barnaba¹, M.R. Gallipoli², P. Klin¹, L. Martelli³,
M. Mucciarelli¹, M. Romanelli¹

¹OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale), Centro di Ricerche Sismologiche, Trieste e Udine

²Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, Tito Scalo (PZ)

³Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli, Bologna

Introduzione. Sono qui presentati i risultati ottenuti nell'ambito di uno studio geofisico-sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito di alcune località della Regione Emilia Romagna colpite dalla sequenza sismica del maggio 2012. La risposta sismica di sito è stata stimata attraverso l'integrazione di modelli teorici risolti numericamente e di dati sperimentali di terremoti registrati da un insieme di stazioni sismiche. Il lavoro fa parte di uno studio più ampio finalizzato alla microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto ML=5.9 del 20 maggio 2012 (Gruppo di lavoro MS Emilia, 2012).

Una delle maggiori difficoltà da superare con l'approccio sperimentale è quella della mancanza di siti di riferimento su roccia (classe A). Infatti, non solo per l'area di pianura ma anche per quella collinare appenninica non sono reperibili siti sufficientemente vicini alle stazioni di registrazione che possano fungere da riferimento con registrazioni rappresentative dell'input sismico su roccia. Questo è uno dei motivi per cui si è reso necessario l'uso di modelli numerici, i quali sono stati utilizzati per calcolare sismogrammi sintetici relativi a una serie di eventi sia presso i siti investigati, sia presso un "sito virtuale di classe A" che rappresentasse al meglio le caratteristiche dei siti rocciosi della catena appenninica emiliana. Calcolando le funzioni di trasferimento tra i siti studiati e il sito virtuale su roccia, è stato possibile convertire le registrazioni disponibili a registrazioni corrispondenti a un sito virtuale di riferimento con suolo di classe A. Queste sono state poi utilizzate per calcolare le risposte dei siti investigati sperimentalmente tramite il metodo dell'inversione Generalizzata GIT (Andrews, 1986) e,

successivamente, gli spettri di risposta specifici di sito e le curve di amplificazione spettrale di risposta, utili per la microzonazione sismica.

Dati sperimentali. Sono stati utilizzati i dati registrati dalle seguenti stazioni:

- 9 stazioni della una rete temporanea realizzata dall’OGS durante la sequenza sismica del 2012 (Priolo *et al.*, 2012; Moretti *et al.*, 2012) e re-installate in parte (4 stazioni) nel mese di marzo 2013.
- sito di Mirandola (MO), una stazione accelerometrica temporanea installata dal CNR durante la sequenza sismica del 2012;
- sito di Casaglia (FE), sismometro *very broad-band* (FERB) in pozzo a profondità di 135 m re-installato nel mese di marzo 2013 e una stazione temporanea in superficie (OG010) parte del gruppo di 4 stazioni installato a marzo 2013.

La Tab. 1 fornisce un quadro sintetico delle stazioni e della strumentazione installata. Il dataset di registrazioni comprende una serie di eventi della sequenza emiliana del 2012 e una serie di eventi del 2013 tra cui le scosse principali della sequenza occorsa in Garfagnana a fine giugno 2013.

Presso i siti strumentati in superficie sono state eseguite analisi di rumore sismico ambientale (microtremore) attraverso il calcolo dei rapporti spettrali tra componente orizzontale verticale H/V, con il metodo noto in letteratura come “metodo di Nakamura”. I risultati di quest’analisi sono discussi in Priolo *et al.* (2012). In generale si riconosce una grande omogeneità di tutti i rapporti H/V: essi sono caratterizzati da un unico picco in bassa frequenza (compreso tra 0.6 e 1.2 Hz), più o meno accentuato ma comunque ben evidente mentre per nessuno dei siti, i rapporti H/V mostrano picchi nella banda medio-alta delle frequenze, segno della mancanza di importanti contrasti di impedenza acustica nei suoli più superficiali.

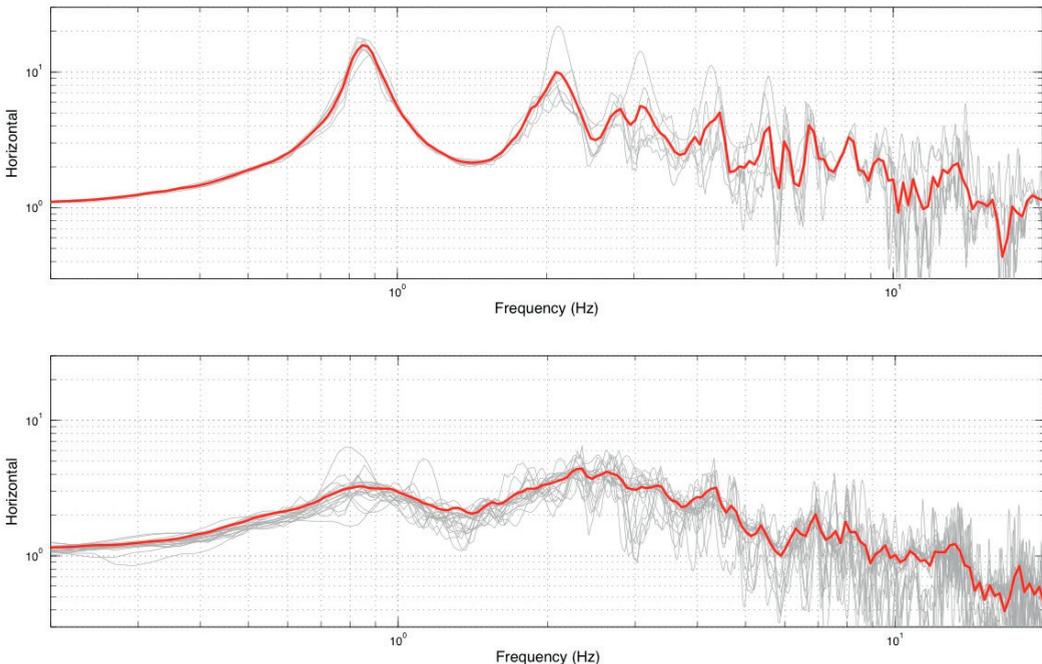


Fig. 1. – In alto: rapporti spettrali medi calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità (funzione interferometrica) per il modello di Casaglia. In basso: amplificazione spettrale stimata per il sito di Casaglia. Componente orizzontale. Le curve grigie in background mostrano i rapporti spettrali ottenuti singolarmente per le diverse sorgenti simulate.

Modellazioni numeriche e modelli strutturali. L'approccio numerico adottato per le modellazioni si basa sul metodo d'integrazione dei numeri d'onda [*Wavenumber Integration Method*, Herrmann (1996a, 1996b)]. Esso risolve l'equazione completa delle onde sismiche con attenuazione in un mezzo 3D stratificato orizzontalmente. In tutte le modellazioni dello studio è stato considerato un modello di sorgente puntuale, cioè la sorgente si concentra in un punto dello spazio.

Sono stati costruiti i modelli numerici presso due siti, rispettivamente Casaglia (FE) e Mirandola (MO), presso i quali erano disponibili delle registrazioni di terremoti. Al fine di validazione dei modelli sono state eseguite, in una fase preliminare, diverse modellazioni per alcuni eventi di riferimento sia a scenario (quindi su ricevitori posti a griglia su un'area estesa) che per singoli ricevitori.

Tutti i modelli descritti sono a strati piani paralleli e, mentre adottano la medesima struttura profonda ($z > 1$ km), derivata dal modello di Malagnini *et al.* (2012), risolvono in dettaglio la parte più superficiale, caratterizzata da suoli a bassa velocità, definita tenendo conto di tutte le informazioni di tipo geologico-geofisico provenienti da diversi studi eseguiti nelle due aree (down hole, analisi ESAC, perforazioni, ...). Infine è stato definito un modello che simula un sito su roccia (Classe A) tipico dell'area Appenninica e caratterizzato dalle basse velocità delle litologie rocciose e elevato degrado superficiale. Esso combina le caratteristiche di un suolo di classe A (valore di VS30 pari a 800 m/s) con una struttura superficiale rappresentativa di un gradiente di velocità crescente con la profondità.

I sismogrammi sintetici sono stati calcolati sia in superficie sia alla profondità di 135 metri, cioè sotto il tetto dei depositi marini consolidati, per tutti i modelli, sia quelli di sito di Casaglia e di Mirandola che del sito virtuale su roccia.

In questo modo è stato possibile valutare, attraverso la tecnica dei rapporti spettrali, sia le amplificazioni dei siti (di Mirandola e Casaglia) sia le funzioni di trasferimento medie tra ricevitori in profondità e superficie (funzioni interferometriche) e tra modelli rappresentativi di suolo e roccia. Alcune di queste funzioni di trasferimento teoriche sono state utilizzate, successivamente, per integrare nelle parti mancanti le risposte calcolate su base sperimentale.

Risultati delle modellazioni. Una prima fase delle modellazioni ha riguardato il confronto tra sismogrammi sintetici e registrazioni. In particolare sono stati messi a confronto i sismogrammi relativi ad un insieme di eventi della sequenza dell'Emilia del 2012 registrati alla stazione di Mirandola e alcuni eventi del 2013 (tra i quali quelli della Garfagnana) registrati invece a Casaglia con quelli calcolati dalle simulazioni numeriche. Presso Casaglia il confronto è stato eseguito sia in superficie sia in profondità, in quanto tale sito ha un sensore posto in superficie e uno in pozzo. Tenendo conto del fatto che i modelli strutturali sono a strati piani paralleli (per cui non tengono conto di eventuali effetti 3D) e che la sorgente è stata definita in modo semplificato, il confronto tra dati sperimentali e dati sintetici è molto buono sia in termini di ampiezze sia di polarità.

In seguito, dai sismogrammi sintetici sono stati calcolati i rapporti spettrali tra ricevitore in superficie e ricevitore in profondità per i due modelli rappresentativi dei siti di Casaglia e Mirandola e per il modello rappresentativo del sito di riferimento virtuale in classe A. La Fig. 1, nel pannello in alto mostra, per il sito di Casaglia, i rapporti spettrali medi della componente orizzontale calcolati tra il ricevitore in superficie e quello posto in profondità. Tale rapporto superficie/bedrock rappresenta il campo d'interferenza registrato in profondità e valutato rispetto a quanto osservato in superficie. Alla posizione del ricevitore in profondità, l'interferenza genera dei buchi spettrali molto evidenti (rappresentativi dei cosiddetti *ghost*) che nel rapporto tra i due ricevitori danno luogo ai picchi. Il pannello in basso mostra invece il rapporto spettrale calcolato per lo stesso modello tra il ricevitore posto alla superficie del sito e quello posto alla superficie del sito di riferimento virtuale in Classe A, cioè l'effettiva curva di amplificazione spettrale del sito, e costituisce pertanto uno dei principali risultati di questo studio. Si può notare come il sito abbia un livello di amplificazione tra 2 e 3 che si estende su tutta la banda 0.6-5 Hz, con un picco a 0.8 Hz e un lobo più esteso centrato a circa 2.2 Hz.

Calcolo della risposta sismica spettrale. Come anticipato, una delle maggiori difficoltà da superare con l’approccio sperimentale è la mancanza di siti di riferimento su roccia (classe A). Questo è uno dei motivi per cui si è reso necessario l’uso di modelli numerici, i quali sono stati utilizzati per “trasferire” le registrazioni al sito di riferimento virtuale. Quest’operazione è stata effettuata facendo riferimento al sito di Casaglia, dove dai primi mesi del 2013 sono disponibili dati registrati da due stazioni poste rispettivamente in profondità (FERB) e superficie (OG010).

La Fig. 2 illustra lo schema secondo cui è stata definita la funzione di trasferimento che ha permesso di convertire le registrazioni effettuate dalla stazione FERB o dalla OG010 a registrazioni rappresentative del moto del suolo presso il sito di riferimento virtuale. La procedura per calcolare la funzione di trasferimento effettua i rapporti spettrali tra i rispettivi sismogrammi, ne considera lo spettro di ampiezza (per le due componenti orizzontali viene preso il massimo dei due valori), quindi i rapporti spettrali relativi a differenti eventi vengono mediati. La funzione utilizzata denominata **H1** è una funzione a due tratti, ibrida sperimentale-sintetica. Il primo tratto, rapporto OG010/FERB, è interamente sperimentale, mentre il secondo è calcolato con le modellazioni numeriche. La funzione **H2** è invece una funzione a un tratto, interamente sintetica, e converte i sismogrammi del ricevitore in superficie del modello realistico in quelle corrispondenti al suolo in Classe A. H1, permette di utilizzare le registrazioni in pozzo di FERB come registrazioni di riferimento, mentre H2 permette invece di usare come riferimento le registrazioni di OG010. La stessa figura mostra altre configurazioni utilizzabili (funzioni H3-H5).

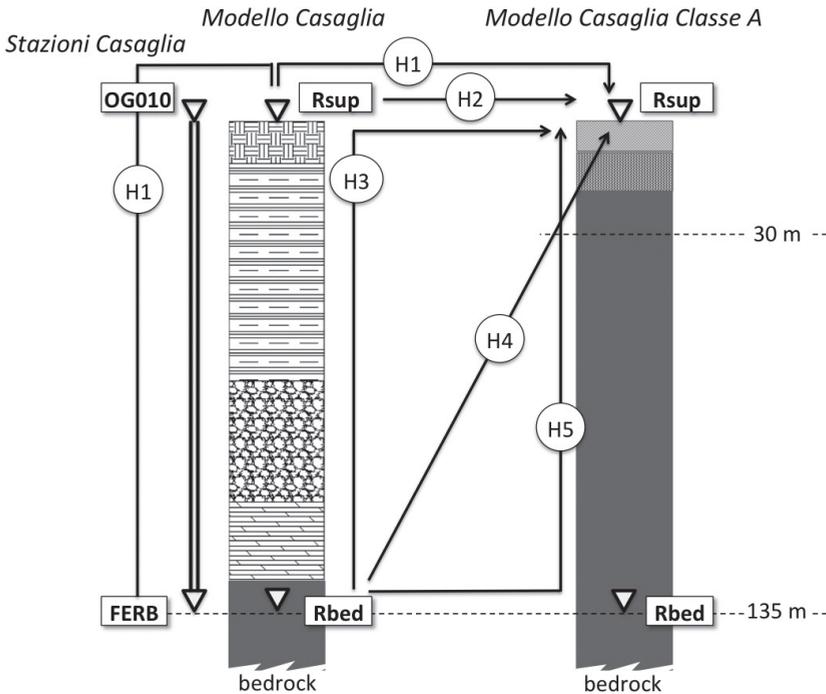


Fig. 2. – Schema di calcolo delle funzioni di trasferimento (H) verso il ricevitore in superficie rappresentativo del sito di riferimento virtuale. In figura sono rappresentati: il pozzo di Casaglia (linea doppia a sinistra) con le stazioni in pozzo (FERB) e in superficie (OG010); i due modelli numerici, rispettivamente “Modello Casaglia”, che rappresenta la stratigrafia vera, e “Modello Casaglia Classe A”, che simula il medesimo modello crostale ma con i 30 m superficiali rappresentativi di un solo strato classe A (roccia) per l’area appenninica emiliana; i ricevitori usati per il modelling rispettivamente nel bedrock e in superficie. Le funzioni di trasferimento che permettono di “trasferire” nel dominio spettrale le registrazioni da un ricevitore verso il sito di riferimento virtuale sono indicate con H#, dove # rappresenta un numero e corrisponde a un dato percorso.

Il calcolo dei rapporti spettrali da registrazioni di terremoti è il punto di partenza per definire le curve di amplificazione spettrale, gli spettri di risposta specifici per il sito e i fattori di amplificazione. Il metodo utilizzato in questo studio per il calcolo dei rapporti spettrali basato su procedure di inversione GIT (Andrews, 1986) che permettono l'utilizzo di registrazioni asincrone (ovvero di eventi diversi) e quindi l'utilizzo di un maggior numero di eventi. In questi ultimi anni, il metodo GIT è stato ulteriormente sviluppato con lo scopo di migliorare l'affidabilità dei rapporti spettrali (Laurenzano *et al.*, 2012). Operata la necessaria conversione delle registrazioni della stazione in pozzo FERB tramite la funzione di trasferimento HI, si è quindi applicato il GIT per il calcolo dei rapporti spettrali presso tutte le stazioni poste in superficie.

Spettri di risposta di sito e amplificazioni spettrali di risposta. Dopo aver stimato le amplificazioni spettrali di Fourier nel dominio delle frequenze, si procede con il calcolo degli spettri di risposta specifici di sito e dei fattori di amplificazione spettrale di risposta.

Questa fase si svolge seguendo la seguente procedura: 1) selezione dell'input sismico; 2) calcolo delle accelerazioni al sito attraverso convoluzione delle storie temporali con le amplificazioni spettrali specifiche di sito (GIT); 3) calcolo degli spettri di risposta; 4) calcolo dello spettro di risposta medio specifico di sito e dei fattori di amplificazione spettrale di risposta.

La selezione dell'input sismico, in accordo agli *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica* (Gruppo di Lavoro MS, 2008), consiste nel selezionare 5 registrazioni accelerometriche caratteristiche per l'area studio. Dalla convoluzione di ognuna delle serie temporali assunte come azione sismica con le amplificazioni spettrali calcolate con il GIT vengono ottenuti gli spettri di risposta e lo spettro di risposta medio specifico di sito.

Quindi, dagli spettri di risposta specifici di sito, si possono calcolare gli spettri lisciati. L'importanza degli spettri lisciati sta nel fatto che essi possono essere descritti in modo parametrico e possono essere confrontati direttamente con gli spettri di normativa. La procedura di lisciatura degli spettri di risposta medi adottata in questo studio è aderente a quanto riportato negli *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica* (Gruppo di Lavoro MS, 2008). Essa prevede, tra l'altro, che gli spettri di risposta di sito siano preventivamente sottoposti a uno *smoothing* in modo da ridurre eventuali irregolarità.

Le amplificazioni di risposta spettrale sono calcolate dal rapporto tra gli spettri di risposta in accelerazione specifici di sito e lo spettro di risposta medio relativo all'azione sismica utilizzata

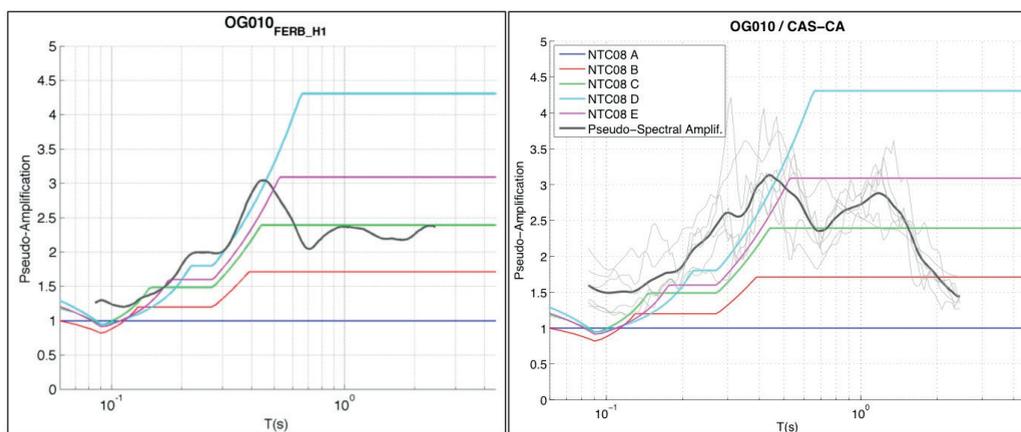


Fig. 3 – Amplificazione di risposta spettrale (linea grigia) stimata per il sito di Casaglia, stazione OG010, con il metodo GIT da registrazioni di terremoti (a sinistra) e con le modellazioni numeriche (a destra). Le curve colorate mostrano le amplificazioni dedotte dagli spettri di normativa per le varie classi di suolo. Le curve grigie in background mostrano le amplificazioni stimare per i singoli eventi modellati.

in input. Queste sono, a nostro parere, le quantità più importanti per la valutazione della risposta sismica locale. Infatti, queste amplificazioni possono essere confrontate direttamente con le amplificazioni dedotte dagli spettri di normativa per le differenti classi di suolo.

La Fig. 3, a sinistra mostra, come esempio, le amplificazioni di risposta spettrale stimate per il sito di Casaglia. L'amplificazione è consistente con quella di un suolo di classe C, tuttavia si riconosce un moderato picco di amplificazione a periodo 0.45 s (2.2 Hz) che raggiunge un fattore 3. È interessante confrontare le curve di amplificazione spettrale stimate attraverso le due diverse strade seguite in questo studio, ovvero l'approccio basato sull'uso di registrazioni di terremoti (metodo GIT) e quello basato sulla pura modellazione numerica. Questo secondo caso è mostrato in Fig. 3, a destra. Ricordiamo che la differenza tra i due approcci sta non solo nel come sono state calcolate le curve di amplificazione di Fourier ma anche nei sismogrammi usati come input. Nel primo caso questi sono costituiti da vere registrazioni la cui media definisce l'azione sismica di riferimento; nel secondo caso si sono considerati un insieme di sismogrammi sintetici che riproducono alcuni eventi effettivamente avvenuti, ma che non rappresentano nel loro complesso un livello di input sismico necessariamente consistente con il livello di pericolosità sismica atteso per l'area. Confrontando le due figure si riconosce che le stime ottenute su base numerica predicono un'amplificazione maggiore ai lunghi periodi. Per il resto le curve sono molto coerenti tra loro. Nell'immediato sono in fase di revisione alcuni aspetti dello studio tra i quali un ulteriore controllo di qualità dei dati sperimentali e un ulteriore aggiornamento del modello strutturale utilizzato per Casaglia al fine di ridurre le discrepanze osservate in alcuni casi.

Un commento generale è che le stime effettuate in questo studio sia per via sperimentale sia per via teorica non tengono in considerazione fenomeni dissipativi/isteretici del suolo. Rispetto a quanto è lecito attendersi per moti forti del suolo, queste curve tendono a sovrastimare l'amplificazione nella banda dei periodi corti (orientativamente minori di 1 s) e sottostimare quella nei periodi lunghi (maggiori di 1 s).

Conclusioni. Sono stati presentati i risultati ottenuti nell'ambito dello studio geofisico-sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito di alcune località della Regione Emilia Romagna colpite dalla sequenza sismica del maggio 2012, per finalità di microzonazione sismica. La risposta sismica di sito è stata stimata attraverso l'integrazione di modelli teorici risolti numericamente e di dati sperimentali di terremoti registrati da un insieme di stazioni sismiche. Lo studio ha costruito e risolto i modelli locali per i siti di Mirandola e Casaglia e ha introdotto un modello rappresentativo di un sito di riferimento virtuale in classe A per l'area emiliana.

Per calcolare la risposta di sito sono state usate registrazioni di terremoti registrati da un insieme di stazioni installate nell'area. Attraverso coppie di registrazioni superficie/pozzo disponibili per il sito di Casaglia, è stata costruita la funzione interferometrica sperimentale per il sensore in profondità. Dall'altra parte, con le modellazioni numeriche sono state calcolate l'amplificazione spettrale per i due siti di Casaglia e di Mirandola e le funzioni di trasferimento tra ricevitori in profondità e in superficie (funzioni interferometriche) e ricevitori in superficie tra i siti studiati e il sito virtuale in classe A. Sono state poi calcolate le funzioni di trasferimento che permettono di convertire le registrazioni su suolo in registrazioni su sito di riferimento virtuale con suolo in classe A, sono state calcolate le risposte di sito dalle registrazioni di terremoti con il metodo GIT, gli spettri di risposta specifici di sito e le curve di amplificazione spettrale di risposta, elementi questi ultimi di diretto utilizzo per la microzonazione sismica.

La peculiarità di questo studio sta nel fatto che esso combina l'utilizzo di dati sperimentali con modelli numerici, non solo per estendere e generalizzare il più possibile la portata dei risultati, ma anche per operare un controllo incrociato tra dati sperimentali e speculazioni teoriche in alcuni passaggi chiave.

Ringraziamenti. Lo studio sismologico è stato finanziato con i fondi dell'Ordinanza n. 70/2012 del Commissario delegato ai sensi dell'art. 1, comma 2, D.L.N.74/2012 nell'ambito dello Studio per la microzonazione di alcuni comuni della regione Emilia-Romagna, con contratto di cui alla Determinazione n. 3291 del 04/04/2013.

Bibliografia

- Andrews, D. J.; 1986. *Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes*, in Earthquake Source Mechanics, S. Das, J. Boatwright, and C.H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., 259-267.
- Gruppo di Lavoro MS; 2008. *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-ROM.
- Gruppo di lavoro MS Emilia 2012. *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della Pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Questo volume.
- Herrmann, R. B., and Wang, C. Y.; 1985. *A comparison of synthetic seismograms*. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 41-56.
- Herrmann, R. B.; 1996a. *Computers program in seismology. An overview of synthetic seismogram computation*. Dep. of Earth and Atmospheric Sciences; Saint Louis University. Version 3.0 edition.
- Herrmann, R. B.; 1996b. *Computers program in seismology*. Volume VI: wavenumber integration. Dep. of Earth and Atmospheric Sciences; Saint Louis University. Version 3.0 edition.
- Laurenzano, G., E. Priolo, e Klin, P.; 2012. *Codice MatLab® per il calcolo della risposta sismica di sito con il metodo dell'inversione generalizzata (GIT)*. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica Studi teorici ed applicazioni professionali*. Aracne Ed., 61-72.
- Malagnini L., Herrmann R. B., Munafò I., Buttinelli M., Anselmi M., Akinci A. and, Boschi E.; 2012. *The 2012 Ferrara seismic sequence: Regional crustal structure, earthquake sources, and seismic hazard*. Geophys. Res. Lett., 39 (19) L19302, doi:10.1029/2012GL053214.
- Moretti *et al.*; 2012. *Rapid-response to the earthquake emergency of May 2012 in the Po Plain, Northern Italy*. Annals of Geophysics, 55 (4); doi:10.4401/ag-6152.
- Priolo E., M. Romanelli, C. Barnaba, M. Mucciarelli, G. Laurenzano, L. Dall'Olio, N. Abu-Zeid, R. Caputo, G. Santarato, L. Vignola, C. Lizza and P. Di Bartolomeo; 2012. *The Ferrara Thrust Earthquakes of May-June 2012 – Preliminary Site Response Analysis at the Sites of the OGS Temporary Network*. Annals of Geophysics, 55 (4), 7 pp. DOI: 10.4401/ag-6172.