ANALISI SISMOLOGICHE PROPEDEUTICHE ALLA MICROZONAZIONE DI 3° LIVELLO NEI 138 COMUNI COLPITI DALLA SEQUENZA SISMICA IN ITALIA CENTRALE

E. Priolo[1], F. Pacor[2], D. Spallarossa[4], G. Milana[3], G. Laurenzano[1], M.A. Romano[1], C. Felicetta[2], S. Hailemikael[5], F. Cara[3], G. Di Giulio[6], G. Ferretti[4], C. Barnaba[1], G. Lanzano[2], L. Luzi[2], M. D'Amico[2], R. Puglia[2], D. Scafidi[4], S. Barani[4], R. De Ferrari[7]

[1] Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, Sezione CRS, Trieste, Italy
[2] INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), Sezione di Milano, Italy
[3] INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), Sezione di Roma, Italy
[4] UNIGE (Università degli Studi di Genova), DISTAV, Italy
[5] ENEA (Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile), Italy
[6] INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), Sezione dell'Aquila, Italy
[7] GEAmb, Genova, Italy

La valutazione della risposta sismica locale dovuta a un terremoto (la risposta del sito) è una fase fondamentale nella microzonazione sismica di terzo livello (cioè il livello più alto) e costituisce un elemento importante per un'accurata quantificazione del rischio sismico. Le linee guida italiane per la microzonazione sismica raccomandano di valutare la risposta di sito mediante l'utilizzo di tecniche sperimentali o numeriche, le prime basate su misure passive di rumore sismico ambientale o di terremoti, le seconde su simulazioni numeriche 1-D e 2-D.

In seguito alla sequenza sismica che ha colpito l'Italia centrale, iniziata con l'evento del 24 agosto 2016 di magnitudo Mw=6.0 e proseguita per diversi mesi, il Commissario Straordinario del Governo per la ricostruzione, ha promosso la realizzazione di studi di microzonazione sismica di terzo livello (MS3) per i 138 Comuni danneggiati dal sisma (appartenenti a quattro regioni italiane: Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria), assegnando il coordinamento scientifico degli studi al Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (CentroMS). Il CentroMS ha previsto una struttura organizzativa di 6 Unità Tematiche (UT) trasversali, formate da esperti dei singoli settori. Una di queste è l'Unità Tematica Analisi Sismologiche (UTAS). Il compito dell'UTAS è stato quello di fornire informazioni quantitative della risposta di sito ai fini della MS3 delle località individuate dall'Ordinanza. L'UTAS è composta di quattro gruppi di lavoro

(elencati in Tab. 1) che hanno operato indipendentemente su diversi set di dati. L'OGS ha coordinato l'attività, mentre l'ENEA ha avuto il ruolo di supporto e coordinamento con il CMS. Il tempo assegnato all'UTAS per l'analisi sismologica è stato molto ridotto, inferiore a tre mesi.

Tab. 1 - Elenco dei gruppi di lavoro appartenenti all'UTAS e coinvolti nello studio. Le colonne indicano rispettivamente il nome gruppo di lavoro e il nome completo delle istituzioni corrispondenti.

OGS	Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, CRS Seismological Section
INGV-MI + UNIGE	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Section of Milan University of Genoa, DISTAV Department
INGV-RM + INGV-AQ	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Section of Rome Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Section of L'Aquila
ENEA	Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

Per l'analisi dei dati sismologici, si è innanzitutto provveduto a censire tutte le stazioni sismiche (sismometriche e accelerometriche, permanenti e temporanee) operanti nell'area interessata. Sono state quindi selezionate solamente le stazioni che si trovavano entro una distanza dalle località da microzonare (corrispondenti alle aree urbane): delle 247 stazioni censite, 111 sono state selezionate per lo studio.

Il dataset di forme d'onda utilizzato per l'analisi consiste in circa 100.000 registrazioni accelerometriche e velocimetriche corrispondenti a più di 1.500 terremoti (M> 2.5) verificatisi dal 2008 in poi. Le registrazioni sono state estratte dai seguenti archivi: Eida (http://www.orfeus-eu.org/data/eida/), RANdownload (http://ran.protezionecivile.it/IT/index.php), ITACA (http://itaca.mi.ingv.it), ESM (http://esm.mi.ingv.it) e OASIS (http://oasis.crs.inogs.it/).

Quindi, per ognuna delle 111 stazioni sono stati calcolati cinque tipi di prodotto:

a) Frequenza fondamentale, ottenuta dall'analisi a stazione singola dei rapporti spettrali tra le componenti orizzontale e verticale (H/V) del moto del suolo stimata sia da registrazioni di terremoti (EHV) sia da rumore sismico ambientale (HVSR);
b) Fattori di amplificazione dei valori di picco di velocità e di accelerazione (FPGV e FPGA), ottenuti dall'analisi dei residui rispetto ai valori medi stimati attraverso la GMPE (*Ground Motion Prediction equation*) ITA10 (Bindi et al., 2011);
c) Funzioni di amplificazione spettrale, stimate dalle registrazioni di terremoti da spettri di Fourier o spettri di risposta applicando diverse metodologie, come la tecnica dei rapporti spettrali rispetto ad un sito di riferimento (RSSR) e la tecnica dell'inversione generalizzata (GIT).
d) Spettri di risposta specifici di sito (RS), stimati attraverso a partire dalle funzioni di amplificazione spettrale e dall'input sismico di riferimento;
e) Fattori di amplificazione spettrale (FA), calcolati dagli spettri di risposta pseudo-accelerazioni per tre bande di periodo (FA1, FA2 e FA3).

Per il calcolo di questi prodotti, ogni gruppo ha svolto le analisi autonomamente utilizzando le proprie procedure e analizzando il dataset relativo alle stazioni di pertinenza.

Un punto importante dello studio consiste nell'identificazione dei siti di riferimento per l'applicazione di tecniche empiriche (tipo RSSR o GIT) che valutano l'amplificazione spettrale di una certa stazione rispetto a quella di una stazione installata su roccia affiorante e caratterizzata da una risposta piatta. L'identificazione di tali siti è stata fatta utilizzando i seguenti criteri: HVSR (o EHV) piatto entro l'intervallo di frequenza analizzato; residui *site-to-site* quasi nulli nell'intervallo di periodo considerato; distanza tra sito investigato e sito di riferimento inferiore a 5 km.

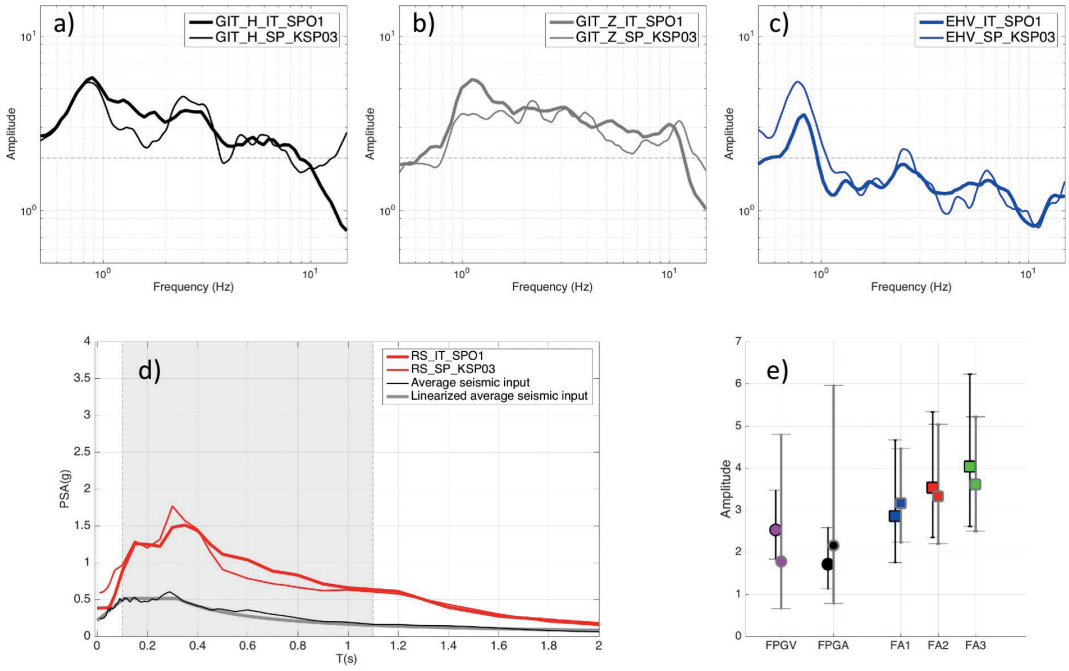


Fig. 1 - Confronto dei risultati ottenuti per le due stazioni IT-SP01 e SP-KSP03 installate presso lo stesso sito, negli uffici del Comune di Spoleto. Le linee spesse e sottili rappresentano le stime ottenute rispettivamente per le stazioni IT-SP01 e SP-KSP03. I pannelli mostrano: GIT calcolato rispettivamente per le componenti orizzontale (a) e verticale (b); EHV (c); spettri di risposta specifici di sito (d), fattori di amplificazione FA (e).

Alcune grandezze, come ad esempio la frequenza fondamentale, sono state ottenute applicando metodologie standard (come gli EHV e HVSR), altri prodotti sono stati invece ottenuti dai diversi gruppi di lavoro utilizzando procedure diverse (ad esempio RSSR, GIT, questi ultimi basati sia su spettri di Fourier che su spettri di risposta) e in alcuni casi anche diversi dataset di registrazioni. Al fine di verificare la coerenza dei risultati ottenuti dalle diverse procedure e dai diversi dataset, è stato eseguito un test di validazione presso uno dei siti esaminati, localizzato nel Comune di Spoleto (Fig. 1). Il confronto dei risultati ottenuti per due stazioni installate presso tale sito mostra un'elevata coerenza tra le curve sia in termini di forma, di ampiezza, e di frequenza di risonanza. I fattori di amplificazione sono paragonabili tra loro, con valori di uno compresi nella deviazione standard dell'altro. Sebbene limitato a un singolo caso, questo test di validazione conferma la robustezza e l'affidabilità dell'intero approccio adottato.

Alla fine delle elaborazioni, per ogni sito-stazione è stata generata una scheda di stazione contenente sia dati informativi di carattere generale (geografico, geologico, strumentale e sismologico) che la rappresentazione grafica dei risultati. Un esempio di scheda di stazione è illustrato in Fig. 2a.

La Fig. 2b illustra invece alcune statistiche estratte dai risultati dello studio. Le distribuzioni degli FA relativi a diversi intervalli di periodo sono simili e per lo più unimodali: la maggior parte dei siti presenta valori medio-bassi di FA (compresi tra 1 e 4), sebbene con alcune differenze tra le tre bande di periodo. Circa il 10% dei siti presenta valori di FA elevati (maggiori di 4), mentre un altro 10% non amplifica il moto del suolo. Le amplificazioni più ampie sono osservate negli intervalli di periodo medio-alti, forse correlati all'intrappolamento di energia delle onde sismiche nei bacini alluvionali. La maggior parte dei siti presenta inoltre valori di FPGV e FPGA moderati (compresi tra 1 e 3), con circa il 15% dei valori inferiori ad 1. Solo pochi siti (meno del 5%) presentano valori elevati (maggiori di 4). Per quanto riguarda la frequenza

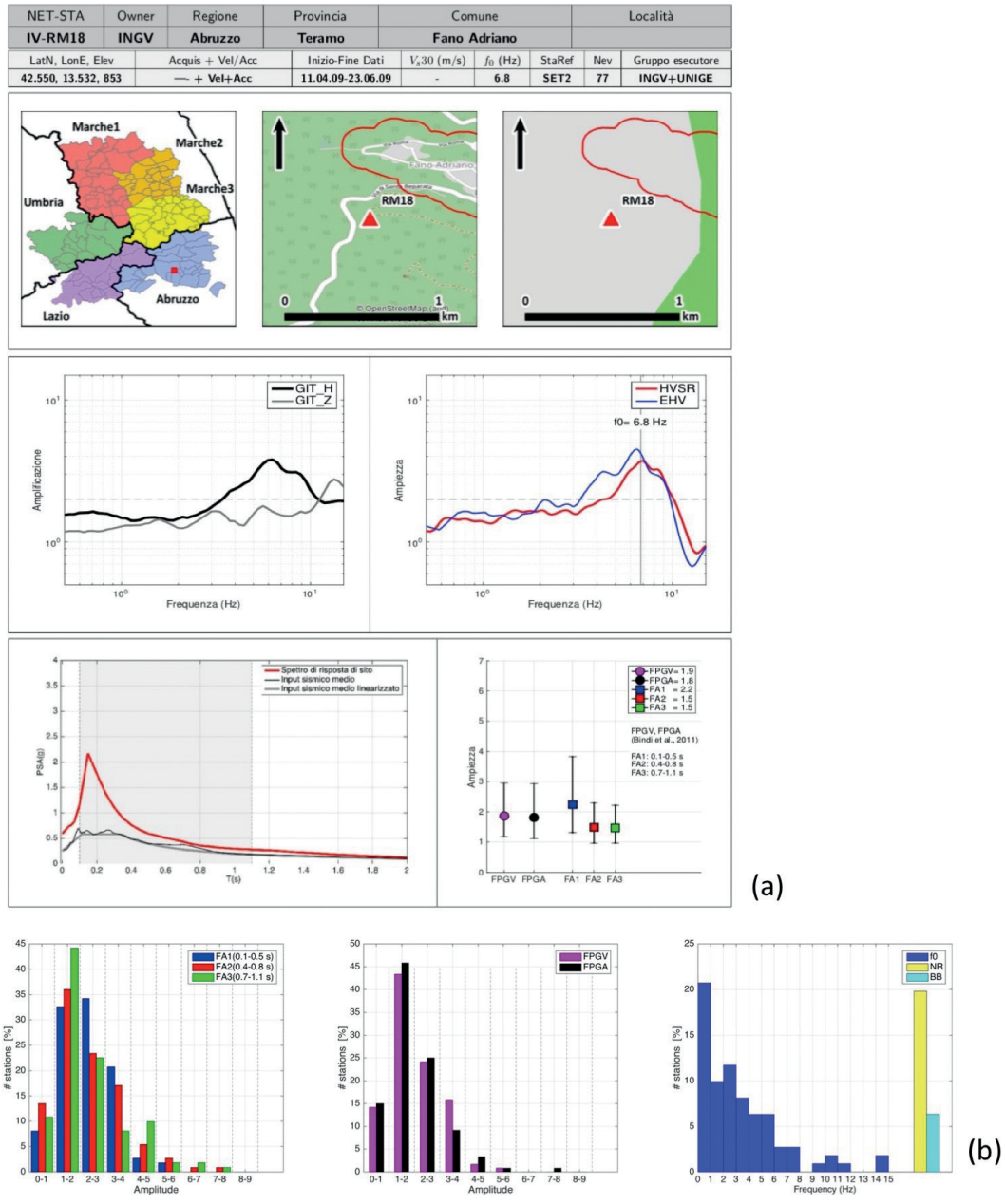
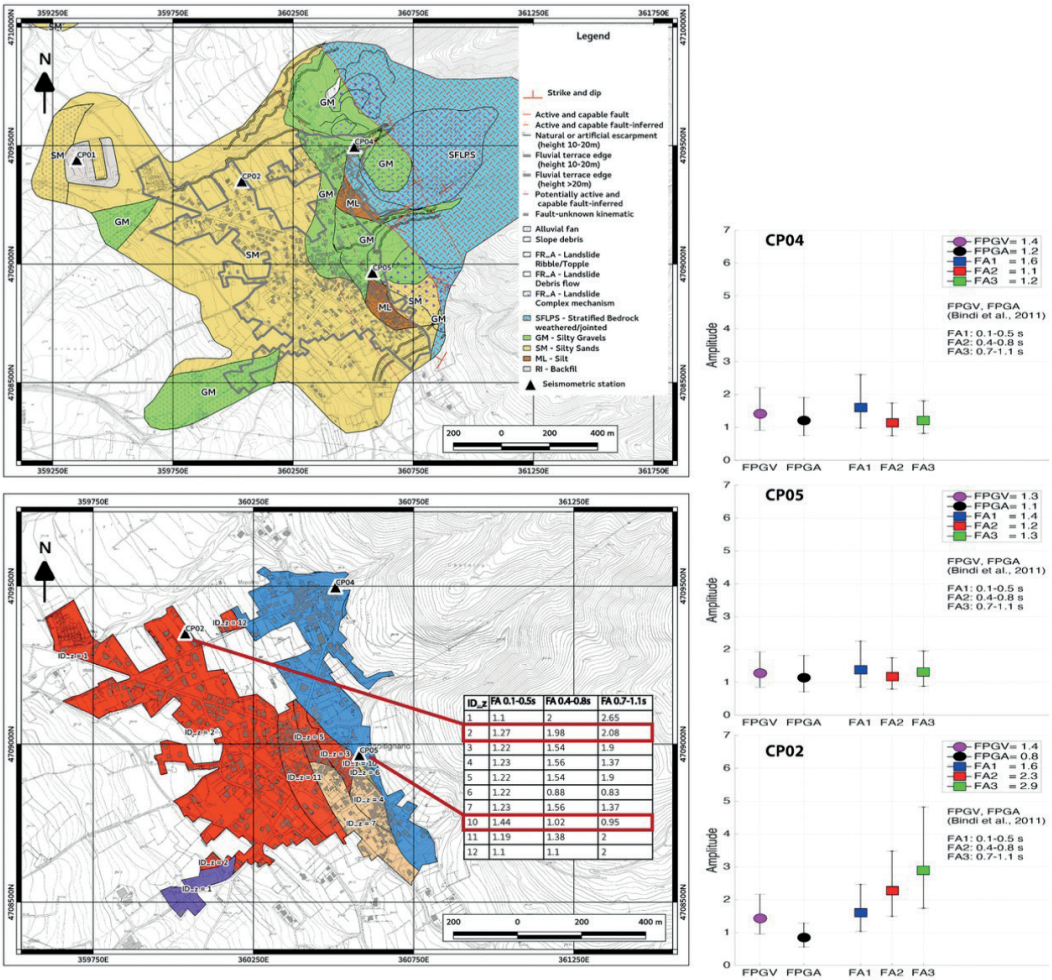


Fig. 2 - a) Scheda di stazione prodotta per il sito-stazione IV-RM18. La testata è composta da campi che riportano informazioni sulla localizzazione del sito-stazione, sulla strumentazione, sulla risposta sismica del sito e sulle analisi svolte. Seguono tre mappe che permetto di localizzare il sito-stazione a scala regionale nel contesto dei raggruppamenti territoriali, e a scala locale attraverso una mappa stradale (tratta da Open Street Map) e rispetto alla geolitologia (tratta dal Geoportale Nazionale, http://www.pcn.minambiente.it/mattm/). Le quattro figure successive rappresentano i prodotti calcolati per stimare la risposta sismica locale e cioè: l'amplificazione spettrale, i rapporti spettrali H/V, lo spettro di risposta specifico di sito e i fattori di amplificazione. b) Distribuzione statistica dei valori dei fattori di amplificazione e delle frequenze di risonanza. Da sinistra a destra: fattori di amplificazione spettrale FA1, FA2 e FA3; fattori di amplificazione PGV e PGA; frequenza di risonanza. Le colonne NR e BB indicano rispettivamente "sito non risonante" (cioè HVSR piatto) e HVSR con amplificazione su una banda larga.



ID_z	FA 0.1-0.5s	FA 0.4-0.8s	FA 0.7-1.1s
1	1.1	2	2.65
2	1.27	1.98	2.08
3	1.22	1.54	1.9
4	1.23	1.56	1.37
5	1.22	1.54	1.9
6	1.22	0.88	0.83
7	1.23	1.56	1.37
10	1.44	1.02	0.95
11	1.19	1.38	2
12	1.1	1.1	2

Fig. 3 - Pannello in alto a sinistra: carta geologica dell'area di Capitignano; lo studio MS3 è stato eseguito nel perimetro raffigurato in grigio chiaro. In basso a sinistra: SM3 di Capitignano; il colore blu distingue la zona stabile rispetto alle zone soggette ad amplificazione sismica (altri colori), per le quali gli FA sono stati calcolati tramite le modellazioni numeriche e riportati, per le 3 bande di periodo, nella tabella all'interno della mappa. Pannelli a destra: FA, FPGV e FPGA derivati sperimentalmente in questo studio per le stazioni CP04, CP05 e CP02. La posizione delle stazioni è indicata all'interno di ciascuna mappa.

fondamentale, questa si attesta in genere su valori compresi tra 0 e 8 Hz, corrispondenti all'intervallo di frequenza di interesse ingegneristico per gli edifici residenziali. Circa il 20% dei siti mostra una risposta piatta (NR).

Per un'area test, abbiamo infine provato a confrontare l'amplificazione stimata dall'analisi sismologica descritta in questo studio con quella valutata nello studio di MS3 e riportata nel database e nelle mappe finali. Ricordiamo che per la MS3, l'amplificazione è ottenuta mediante simulazioni numeriche 1D o 2D, che utilizzano modelli geologici di dettaglio.

L'esempio mostrato in Fig.3 si riferisce all'area urbana di Capitignano (modificato da Nocentini, 2018) che si trova all'interno di un bacino sedimentario riempito con depositi quaternari lacustri, con detriti, depositi alluvionali e colluviali che si estendono nella zona pedemontana. Il rilievo è costituito da Flysch che rappresenta il substrato locale. In quest'area sono state installate tre stazioni sismiche della rete XO: CP02, CP04 e CP05. CP02 è posta sul riempimento quaternario del bacino, mentre CP04 e CP05 sono situati rispettivamente su Flysch

e depositi alluvionali. In Fig. 3 gli FA sono confrontati per i siti CP02 e CP05, poiché solamente queste due stazioni si trovano in aree soggette ad amplificazione sismica. Per ambedue i siti su può osservare come gli FA derivati sperimentalmente siano in buon accordo con quelli ottenuti numericamente dalle modellazioni, confermando quindi la ricostruzione geologica su cui si basano i modelli numerici stessi.

In conclusione, ricordiamo che lo studio dell'Unità Tematica Analisi Sismologiche qui descritto è stato effettuato in tempi ridottissimi; una notevole quantità di informazioni quantitative è stata consegnata al CentroMS e alle autorità, fornendo importanti indicazioni per la MS3 di 109 comuni danneggiati e la loro ricostruzione. Riteniamo che questa esperienza possa rappresentare un modello di riferimento futuro per la predisposizione di efficaci interventi tecnico-scientifici nelle fasi immediatamente successive a un terremoto distruttivo.

Bibliografia

Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G., Paolucci R.; 2011: *Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion data*. Bull. Earthq. Eng., **9**, 1899-1920, DOI 10.1007/s10518-011-9313-z.

Nocentini M.; 2018: *Comune di Capitignano (AQ) "Studio di Microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Capitignano*, ai sensi dell'Ordinanza del Commissario Straordinario n° 24 registrata il 15/05/2017 al n°1065" (in italian)

Unità Tematica Analisi Sismologiche; 2017: *Prodotto 4.2. (2017). Analisi dei dati sismologici esistenti ai fini della MS di livello 3 stima dell'amplificazione sismica e degli spettri di risposta specifici di sito - Stima dell'amplificazione sismica e degli spettri di risposta specifici di sito rapporto completo – Versione 1*. Agosto 2017. Convenzione tra Commissario straordinario del governo per la ricostruzione sisma 2016 e Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni) - Supporto e coordinamento tecnico-scientifico per le attività di microzonazione sismica dei territori colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016.