

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO – PARMA

Strada Giuseppe Garibaldi 75, I-43121 Parma

MO-E-1357 – ADEGUAMENTO DEI MANUFATTI DI REGOLAZIONE E SFIORO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA COMPRESIVO DELLA PREDISPOSIZIONE DELLA POSSIBILITÀ DI REGOLAZIONE IN SITUAZIONI EMERGENZIALI ANCHE PER PIENE ORDINARIE IN RELAZIONE ALLA CAPACITÀ DI DEFLUSSO DEL TRATTO ARGINATO (EX CODICE 10969) E AVVIO DELL’ADEGUAMENTO IN QUOTA E POTENZIAMENTO STRUTTURALE DEI RILEVATI ARGINALI DEL SISTEMA CASSA ESPANSIONE ESISTENTE

**MO-E-1273 – LAVORI DI AMPLIAMENTO E ADEGUAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA NEL COMUNE DI RUBIERA (RE)
(ACCORDO DI PROGRAMMA MINISTERO – RER – PARTE A)**

PROGETTO DEFINITIVO

**R.32 – STUDIO DI PERICOLOSITA’ SISMICA
E STIMA DELL’INPUT SISMICO DI RSL**

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



ING. FULVIO BERNABEI
ING. STEFANO ADAMI
ING. LAURA GRILLI
ING. GIANLUIGI SEVINI
ING. PAOLO SANAVA

MANDANTE
RAPPORTI CON ENTI TERZI – MODELLISTICA IDROLOGICA E
IDRAULICA – IDROGEOLOGIA



ING. DENIS CERLINI
ING. MARCO BELICCHI
ING. NICOLA PESSARELLI (CSP)
ING. MICHELE FERRARI

MANDANTE
INGEGNERIA STRUTTURALE



ING. MARCO G. P. BRAGHINI
ING. DANIELE L. GIOMETTI

MANDANTE
GEOLOGIA



EN GEO S.r.l.
ENGINEERING GEOLOGY
www.engeo.it

GEOL. CARLO CALEFFI
GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE
ASPETTI AMBIENTALI



ING. MASSIMO SARTORELLI
ING. BENIAMINO BARENGHI
DOTT. AGR. ALESSIA MANICONE
DOTT.SSA CHIARA LUVIE'

MANDANTE
ASPETTI PAESAGGISTICI



ARCH. ANGELO DAL SASSO

PER IL R.T.P.:

IL PROGETTISTA GENERALE
DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

IL RUP:

DOTT. ING.
FEDERICA PELLEGRINI

CONSULENTE
INGEGNERIA GEOTECNICA



PROF. ING. FRANCESCO COLLESELLI
ING. GIUSEPPE COLLESELLI

CONSULENTE
PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO

GEOM. MARCO SOZZE'

CONSULENTE
VALUTAZIONI ARCHEOLOGICHE

DOTT.SSA IVANA VENTURINI

DATA: AGOSTO 2021

Mod.7.3 F - Rev.01

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.
01					
02					

Regione Emilia-Romagna
Comune di Modena

Studio di pericolosità e stima dell'input sismico di RSL per la cassa di espansione del F. Secchia a Modena

Rapporto tecnico

Committente:
ENGEO S.r.l.
Via Suor Maria Adorni, 2
43100 Parma

23 aprile 2021
Documento 21885_20210423_R00_00_Secchia

Studio di pericolosità e stima dell'input sismico di RSL per la cassa di espansione del F. Secchia a Modena

Rapporto tecnico

INDICE

1	Dati identificativi dell'incarico	4
2	Limitazione di responsabilità	5
3	Introduzione e scopo del lavoro	6
4	Inquadramento generale	7
4.1	<i>Il progetto</i>	7
4.2	<i>Cenni di sismotettonica</i>	8
4.3	<i>Quadro normativo</i>	9
4.4	<i>Pericolosità sismica di base</i>	11
5	Pericolosità sismica sito-specifica	15
5.1	<i>Geometria della sorgente</i>	15
5.1.1	La zonazione sismogenetica ZS9	15
5.2	<i>Rappresentatività catalogo terremoti</i>	19
5.3	<i>Tasso di sismicità</i>	22
5.4	<i>Magnitudo massima</i>	23
5.5	<i>Leggi di attenuazione</i>	24
5.6	<i>Schematizzazione albero logico</i>	25
5.7	<i>Risultati delle simulazioni PSHA</i>	27
5.7.1	Moto orizzontale del suolo	27
5.7.2	Moto verticale del suolo	29
6	Analisi della sismicità storica e delle sorgenti sismogenetiche.....	32
7	Elaborazione di accelerogrammi naturali per la rsl	36
7.1	<i>Tipologia degli accelerogrammi</i>	36
7.2	<i>Procedure di disaggregazione e scelta dei cluster magnitudo-distanza</i>	36
7.3	<i>Fonti degli AN</i>	37
7.4	<i>Procedure di elaborazione e scalatura</i>	38
7.4.1	Selezione AN per lo Stato Limite di Danno - SLD	38
7.4.2	Selezione AN per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita - SLV	40
7.4.3	Selezione AN per lo Stato Limite di Collasso - SLC	42
8	Conclusioni.....	44
9	Bibliografia	45

LISTA DI DISTRIBUZIONE

Nominativo	Azienda	Copie a stampa	Copie digitali
Copia ufficio	Adastra Engineering srl	=	✓
Dr. Carlo Caleffi	Engeo srl	=	✓

EMISSIONI

Ver.	Codice documento	Data	Riesame	Verifica	Approvazione
00	21885_20210423_R00_00	23/04/21	G. Rigatto	M. Bondesan	R. Francese

1 Dati identificativi dell'incarico

Codice commessa:

21885

Committente:

ENGEO S.r.l.

Via Suor Maria Adorni, 2

43100 Parma

Referente:

dr. Carlo Caleffi

Area di studio:

Cassa di espansione fiume Secchia

Affidatario:

Adastra Engineering srl

sede legale: v. Xola, 41b 30020 Torre di Mosto (Ve)

sede operativa: v. Confin, 87b 30020 Torre di Mosto (Ve) tel. 0421-325683

fax 0421-326532 www.adastra.it info@adastra.it

c.f. p. iva - reg. impr.ve 04251560274 - n° rea cciaa VE 378954

Documento di riferimento:

offerta P211491/21885

Oggetto dell'incarico:

Studio della pericolosità sismica per la cassa di espansione del fiume Secchia

Rilievi:

==

Acquisizione ed elaborazione dati

==

Contenuto del presente documento:

Il presente rapporto descrive le modalità di elaborazione dei dati ed espone i risultati ottenuti relativamente all'input sismico di RSL per la cassa di espansione del F. Secchia a Modena

2 Limitazione di responsabilità

Adastra Engineering srl eroga i propri servizi secondo gli standard operativi del proprio Sistema di Gestione Integrato di Qualità, in conformità a quanto previsto dalle norme UNI EN ISO 9001:2015.

I risultati e le interpretazioni delle indagini esposte nel presente rapporto tecnico si fondano sull'applicazione di norme, tecniche e conoscenze scientifiche allo stato dell'arte, e possono includere calcoli, pareri e valutazioni professionali inerenti i fenomeni e i processi analizzati.

Le considerazioni espresse si fondano sugli esiti delle investigazioni condotte e sulle informazioni disponibili, e ne sono strettamente condizionate dal grado di approfondimento, dall'approccio tecnico-scientifico adottato e dal programma di lavoro approvato dal Cliente.

Le valutazioni ed i suggerimenti operativi contenuti nel presente rapporto vanno intesi in senso generale come proposte di intervento e non come azioni vincolanti, salvo ciò non sia specificatamente indicato. Nessuna responsabilità viene assunta rispetto all'uso che terzi potranno fare in relazione al contenuto di quanto esposto su questo rapporto tecnico.

Adastra Engineering srl declina ogni responsabilità per qualsiasi danno, diretto, indiretto, incidentale e consequenziale legato all'uso, proprio o improprio delle informazioni contenute in questo rapporto, ivi inclusi senza alcuna limitazione, la perdita di profitto e l'interruzione di attività aziendale o professionale.

Il presente rapporto riveste un carattere esclusivamente tecnico e non costituisce parere legale.

4 Inquadramento generale

4.1 Il progetto

Il progetto prevede l'adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia, l'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente e infine l'ampliamento e adeguamento della cassa di espansione sullato del Comune di Rubiera.

I manufatti di regolazione (Figura 1) sono due: l'opera di sbarramento principale posta in alveo e lo sfioratore laterale che regola il sistema della cassa di espansione.



Figura 1. *Mapa di inquadramento dell'area di studio con in evidenza i manufatti di regolazione (immagine tratta da Google Earth, 2021).*

L'opera di sbarramento principale è in calcestruzzo ed è completamente tracimabile con ciglio sfiorante a quota s.l.m.m. pari a 46.25 m, essa è alta 12 m con riferimento alla quota del punto più depresso del paramento di valle, ha una lunghezza di 150 metri con soglia posta alla quota s.l.m.m. di 37.25 m. Il raccordo del manufatto agli argini perimetrali è realizzato con rilevati arginali in terra

con sommità minima a quota s.l.m.m. di 49.25 m con paramento di monte parzialmente rivestito in conglomerato cementizio.

Lo sfioratore laterale ha una lunghezza di 120 m ed è posto a quota di 45.40 m s.l.m.m. I rilevati arginali, in corrispondenza della zona perimetrale prossima al manufatto regolatore, hanno larghezza pari a circa 4 m in sommità e 68 m alla base, e sono caratterizzate dalla presenza di banche e sottobanche collegate tra loro da tratti inclinati a differente pendenza.

4.2 Cenni di sismotettonica

La zona del progetto interessa il primo segmento di pianura del Fiume Secchia, e si trova in zona pedeappenninica. Le strutture sismotettoniche sono nel complesso abbastanza note e sono state studiate con grado di dettaglio via via crescente a partire dai primi studi degli anni '80. Lo schema generale (Vannoli et al., 2015) definisce due fronti: Alpino e Appenninico (Figura 2a).

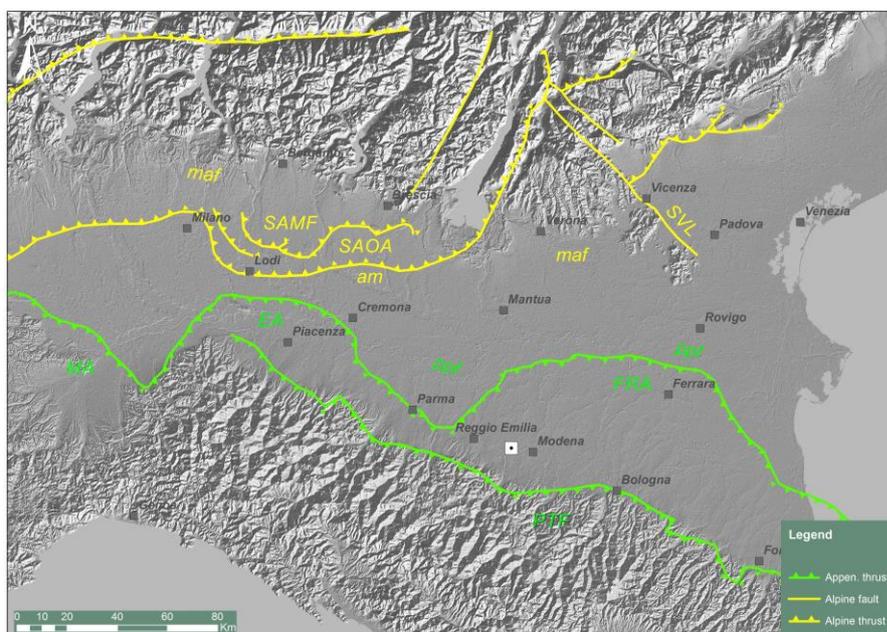


Figura 2a. Schema strutturale della Pianura Padana. Le strutture del sistema appenninico e del sistema alpino sono evidenziate rispettivamente in verde e in giallo Parma (modificato da Vannoli et al., 2015). PFT: sistema di sovrascorrimento pedeappenninico; MA, EA e FRA: archi dei sovrascorrimenti avanzati; ppf: avanfossa padana; SAMF: fronte alpino; SAOA: archi esterni delle Alpi Meridionali.

Recentemente, e a seguito del terremoto del 2012, le strutture sono state oggetto di ulteriore approfondimento in virtù di uno studio condotto dalla Regione Emilia-Romagna e pubblicato nel 2017 (RER, 2017; Martelli et al., 2017) che riprende e aggiorna la carta sismotettonica pubblicata nel 2004 (RER, 2004). In vicinanza del sito vi sono diverse strutture sismogenetiche attive con meccanismo focale per lo più riferibile a fagliazione inversa (Figura 2b).

Le magnitudo massime attese per le strutture immediatamente prossime al sito di progetto (DISS Working Group, 2018) sono, in ordine crescente, di: 5.5 (linea Campegine-Correggio), 5.6 (linea Busseto-Cavriago), 5.9 (linea Langhirano-Sassuolo), 6.0 (linea Carpi-Poggio Renatico) e ancora 6.0 (linea Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme). Nel circolo esterno vi sono altre strutture la cui magnitudo massima raggiunge il valore di 6.7 (linea Adige Plain).

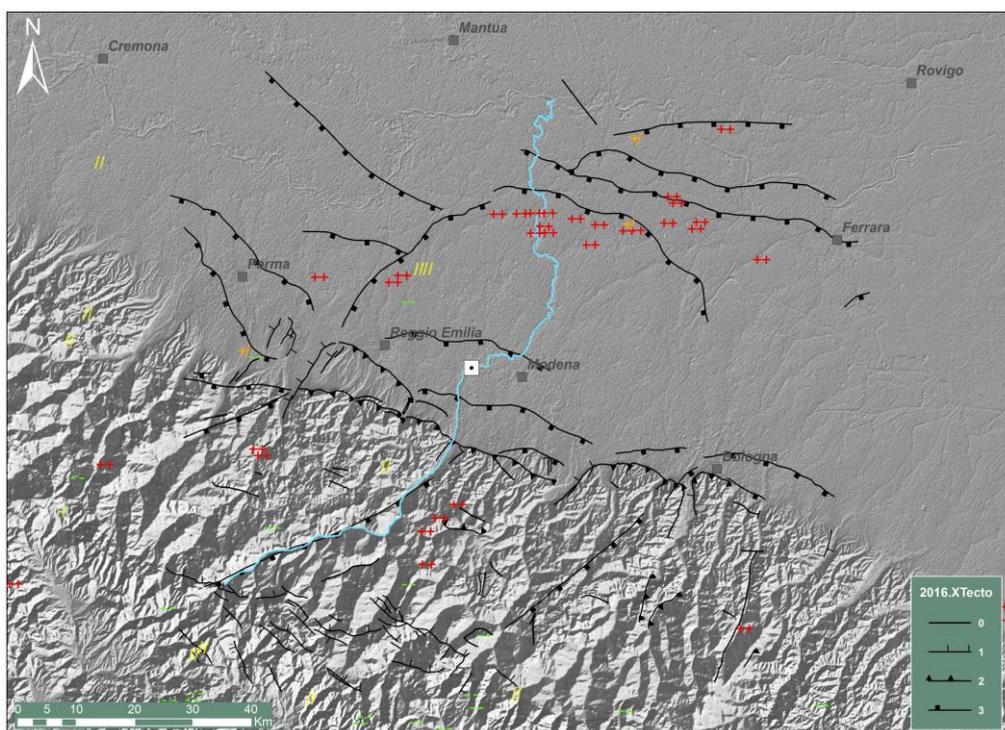


Figura 2b. *Principali elementi tettonici attivi e presumibilmente attivi ubicati in vicinanza del sito (quadrato bianco) come desumibile dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250,000 del 2016: 0 - faglie; 1 - faglie dirette; 2 - faglie inverse; 3 - sovrascorrimenti. Sono altresì rappresentati i principali meccanismi focali: ++ compressivo, +/ transpressivo, // trascorrente, -/ transtensivo, -- distensivo.*

4.3 Quadro normativo

Lo studio fa riferimento alla recente Normativa Tecnica Dighe (MIT, 2014) che si applica a tutti gli sbarramenti di ritenuta del territorio nazionale. Secondo tale normativa qualora il sito ricada in aree per le quali l'azione sismica, per un tempo di ritorno di (T_R) di 475 anni, superi il valore di 0.15 g, è necessario uno studio ad hoc dal quale derivare la pericolosità e l'azione sismica di progetto. Il vincolo posto dalla norma è che i valori non siano comunque meno gravosi di quelli definiti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC).

	SLE		SLU	
	SLO $P_{VR}(\%)=81$	SLD $P_{VR}(\%)=63$	SLV $P_{VR}(\%)=10$	SLC $P_{VR}(\%)=5$
T_R	90	150	1425	2475

Tabella 1. Periodi di ritorno dell'azione sismica per l'opera considerata. SLE: Stato Limite di Esercizio; SLU: Stato Limite Ultimo; SLO: Stato Limite di Operatività; Stato Limite di Danno; SLV: Stato Limite di salvaguardia della vita; SLCL Stato Limite di prevenzione del Collasso.

In base al tipo di opera vengono definiti i parametri di vita nominale (V_N) e di coefficiente d'uso (C_U). Il periodo di riferimento (V_R) per l'analisi dell'azione sismica si determina in base al prodotto di V_N per C_U .

L'opera considerata (diga rilevante, categoria grandi dighe) ha una V_N di 100 anni associata ad una classe d'uso III (l'uso prevede affollamenti significativi) che corrisponde ad un C_U di 1.5 determinando un T_R di 150 anni.

I periodi di ritorno per la stima dell'azione sismica, con riferimento alle probabilità di eccedenza (P_{VR}) definite nelle vigenti NTC, sono riportati in Tabella 1.

Lo spettro di risposta elastico di normativa (Figura 3) per il T_R di 2475 ha un valore intorno a 0.72g mentre quello per il T_R di 1425 anni ha un valore appena inferiore a 0.6 g.

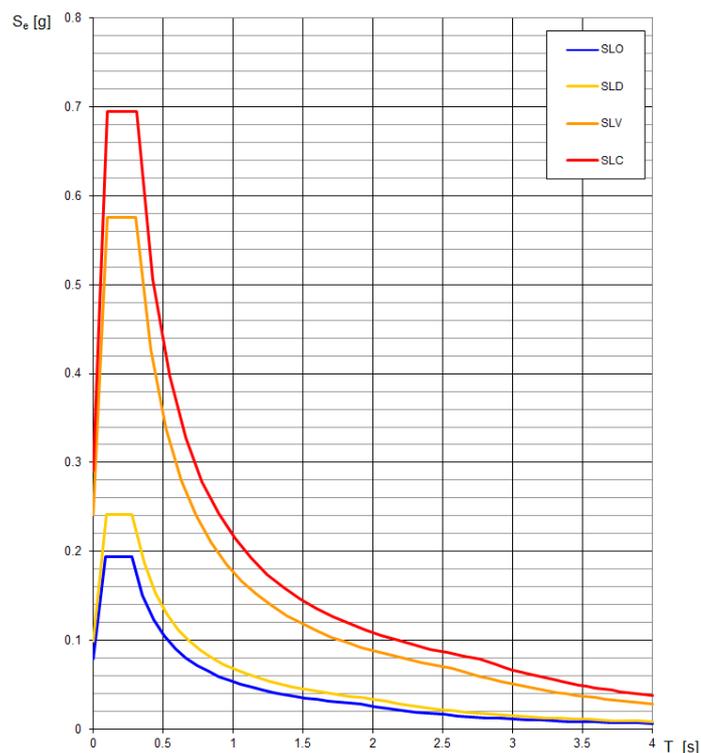


Figura 3. Spettri di risposta elastica di normativa (NTC, 2018) per un V_R di 150 anni e T_R rispettivamente di 90, 150, 1425 e 2475 anni.

4.4 Pericolosità sismica di base

Il sito di progetto si colloca proprio in corrispondenza del nodo 16057 del modello di pericolosità sismica del territorio nazionale MPS04-S1 (MPS Working Group, 2004) che si trova alla coppia di coordinate Dlat, Dlon: 44.655, 10.821.

I valori di pericolosità sismica di base per il sito di progetto (Figura 4a) sono stimati per un periodo di riferimento P_R di 50 anni e per un'eccedenza al 10% (T_R di 475 anni). La PGA ricade nella classe 0.150-0.175 g. L'apertura della mesh è di 0.05 gradi decimali in latitudine e in longitudine.

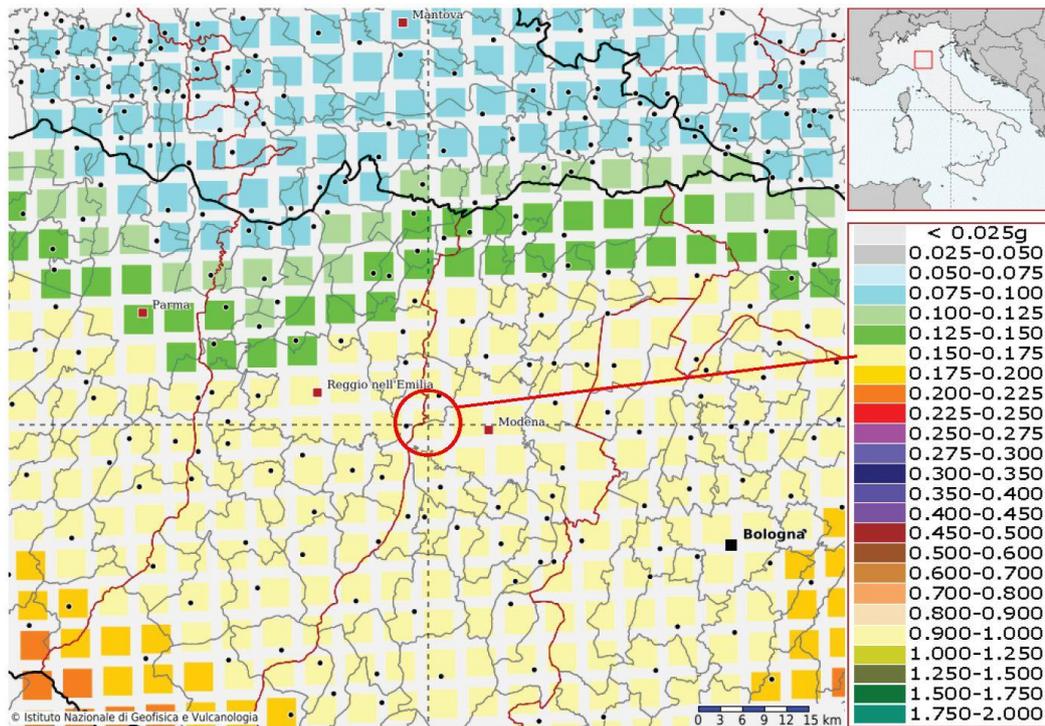


Figura 4a. *Modello di pericolosità sismica centrato sul sito di progetto. È rappresentato il valore di scuotimento (PGA = Peak Ground Acceleration; accelerazione di picco del suolo, espressa in termini di g, l'accelerazione di gravità) atteso con una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni su suolo rigido (classe A, $V_{s30} > 800$ m/s) e pianeggiante.*

La curva di pericolosità (Figura 4b) è l'insieme dei valori di scuotimento (in questo caso per la PGA) per diverse frequenze annuali di eccedenza (valore inverso del periodo di ritorno).

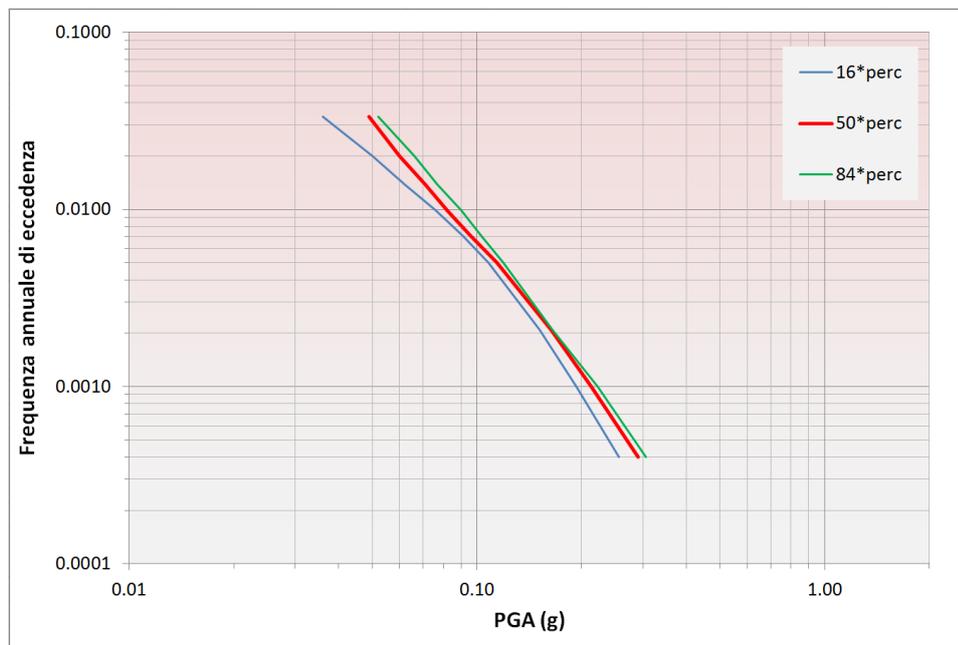


Figura 4b. *Valori di scuotimento (in questo caso per la PGA) per diverse frequenze annuali di eccedenza.*

Per quanto riguarda infine gli spettri di pericolosità (*Uniform Hazard Response Spectra - UHRS*) per i diversi periodi di scuotimento del suolo (Figura 4c) si osserva come per il valore di picco, relativo alla probabilità di eccedenza del 5% ($T_R=975$ anni, SLC per $P_R=50$ anni), di accelerazione quasi raggiunga 0.55 g.

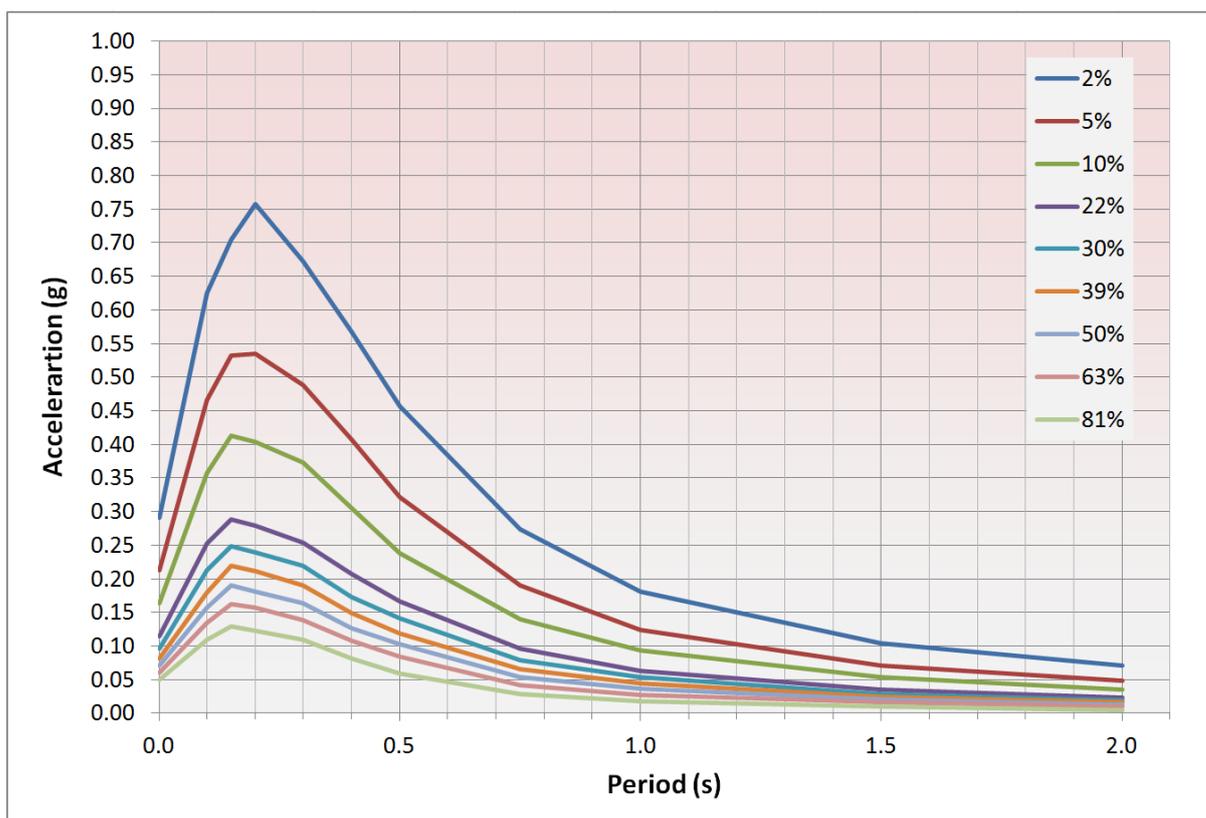


Figura 4c. *Stime mediane (50mo percentile) degli spettri a pericolosità uniforme (UHS) calcolati per 11 periodi spettrali, compresi tra 0 e 2 secondi, per diverse probabilità di eccedenza e per un periodo di riferimento V_R 50 anni.*

I valori di picco relativi alla probabilità di eccedenza del 10% ($T_R=475$ anni, SLV per $P_R=50$ anni) e del 63% ($T_R=50$ anni, SLD per $P_R=50$ anni) sono rispettivamente di 0.40 g e di 0.15 g.

		2	5	10	22	30	39	50	63	81
Periodo (s)	0.00	0.291	0.213	0.163	0.114	0.096	0.082	0.071	0.060	0.049
	0.10	0.625	0.466	0.357	0.252	0.213	0.180	0.157	0.134	0.109
	0.15	0.705	0.532	0.413	0.288	0.249	0.219	0.190	0.162	0.129
	0.20	0.757	0.535	0.403	0.279	0.239	0.211	0.181	0.157	0.122
	0.30	0.673	0.489	0.373	0.254	0.219	0.190	0.164	0.139	0.109
	0.40	0.568	0.407	0.306	0.208	0.173	0.149	0.127	0.108	0.082
	0.50	0.456	0.321	0.238	0.166	0.141	0.119	0.103	0.084	0.059
	0.75	0.274	0.190	0.140	0.096	0.079	0.065	0.053	0.042	0.028
	1.00	0.181	0.124	0.094	0.063	0.053	0.044	0.036	0.027	0.018
	1.50	0.104	0.071	0.053	0.035	0.029	0.024	0.020	0.016	0.010
	2.00	0.071	0.048	0.035	0.023	0.019	0.016	0.013	0.010	0.005

Tabella 2. Valori di accelerazione ai vari periodi (s) per diverse probabilità (%) di eccedenza in 50 anni.

5 Pericolosità sismica sito-specifica

Al fine di meglio definire la pericolosità sismica del sito sono stati utilizzati oltre ai dati prodotti per il modello di pericolosità del 2004 (MPS Working Group, 2004) anche una serie di nuovi dati di natura tettonico-sismologica che sono stati via via prodotti nel corso degli ultimi 15 anni. L'approccio per la stima della pericolosità si basa sempre su un albero logico a diversi rami con relativi pesi che producono un numero di scenari di output che è pari al numero di rami del modello.

Per l'albero logico sono stati utilizzati i seguenti blocchi:

- A. Geometria della sorgente (1 ramo);
- B. Rappresentatività catalogo dei terremoti (1 ramo);
- C. Modello di sismicità (3 rami);
- D. Magnitudo della sorgente (2 rami);
- E. Equazioni di attenuazione (3 rami).

L'insieme dei blocchi (1x1x3x2x3) produce 18 diversi scenari.

5.1 Geometria della sorgente

Per la geometria della sorgente è stata utilizzata la zonazione sismogenetica ZS9 (MPS Working Group, 2004; Meletti e Valensise, 2004, Meletti et al., 2008) cercando di meglio definire i parametri della sorgente sulla base di una serie di studi recenti. In particolare, sono state meglio definite la profondità (DISS Working Group, 2018; ISiDe Working Group, 2015), la magnitudo (DISS Working Group, 2018) e i meccanismi focali (Pondrelli et al., 2011).

5.1.1 La zonazione sismogenetica ZS9

Le zone prossime al sito di progetto (Figura 5) sono quelle prealpine (906 e la 907) verso nord e quelle tipicamente appenniniche verso ovest (911) e verso sud (913, 914, 915 e 916) e infine quella pedeappenninica di stretta pertinenza del sito (912).

La zona 906 interessa l'area che va da Bassano del Grappa fino a Verona. In questa zona vi è una sorgente sismogenetica importante identificata come ITIS140 nella attuale versione del DISS e la cui massima magnitudo (M_w) è pari a 6.7 ed è ritenuta responsabile del terremoto di Verona del 1117. Vi è anche una struttura (ITDS067) la cui presenza era stata ipotizzata già negli anni '70 sulla base di una forte anomalia nel corso del Fiume Mincio e che rimane come struttura in corso di definizione nella recente versione del database DISS 3.2.1 (DISS Working Group, 2018). Il meccanismo focale medio della zona è transtensivo. In questa zona vi sono altre due sorgenti individuali ubicate appena a nord della città di Vicenza (ITIS 127 e ITIS102).

La zona 907 include la parte più bassa delle province di Bergamo e Brescia. È caratterizzata da una sismicità di energia normalmente medio-bassa con la sola eccezione del terremoto di Soncino, evento del 1802, a cui viene assegnata una magnitudo M_w intorno a 5.9. La sorgente sismogenetica è identificata con ITIS104 con massima magnitudo (M_w) è pari a 5.7 Il meccanismo focale medio della zona è transpressivo.

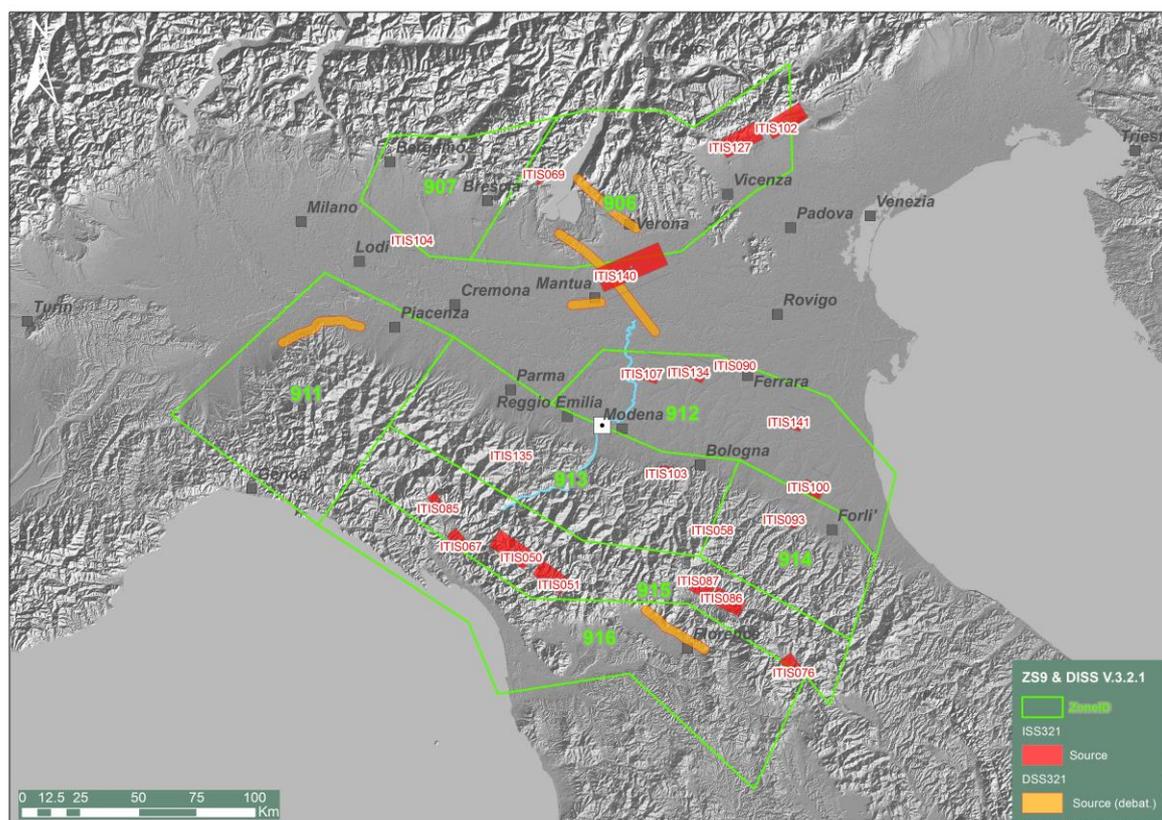


Figura 5. Limiti delle zone della ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) e sorgenti sismogenetiche individuali tratte da DISS V.3.2.1 (DISS Working Group, 2018). In rosso le sorgenti certe in arancio quelle ancora dibattute.

La zona 911 comprende il cosiddetto “arco di Pavia” e le strutture ad esso relative. Si suppone che la funzione delle strutture comprese all'interno della zona sia di “svincolo” cinematico del sistema supposto in migrazione (Patacca et al., 1990). Vi è una struttura in corso di definizione con identificativo ITDS001 nella recente versione del database DISS 3.2.1 (DISS Working Group, 2018). Il meccanismo focale medio è di tipo distensivo.

La zona 912 è quella di stretta pertinenza del sito di progetto. Si tratta della porzione più esterna della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale già ridefinita rispetto alla ZS4 (Scandone e Stucchi, 2000), tenendo conto delle nuove informazioni sulla geometria delle sorgenti (e.g. Burrato et al., 2003; Vannoli et al., 2004; Vannoli et al., 2015) e del regime di stress in atto (e.g.

Montone et al., 1999). La fascia viene chiusa poco a Sud di Porto S. Giorgio, laddove non si hanno più chiare evidenze di cinematica compressiva. La zona è stata anche rivalutata dopo il terremoto dell'Emilia del 2012 (Meletti et al., 2012) con inclusione di nuove sorgenti nel DISS 3.2.1 (DISS Working Group, 2018). All'interno della zona sono state definite cinque sorgenti. La sorgente ITIS107 (Mirandola) ha una magnitudo Mw di 6.0, la sorgente ITIS134 (Finale Emilia) ha una magnitudo Mw di 6.1, la sorgente ITIS105 (Ferrara) ha una magnitudo Mw di 5.5, la sorgente ITIS141 (Argenta) ha una magnitudo Mw di 5.8 e infine la sorgente ITIS100 (Bagnacavallo) ha una magnitudo Mw di 5.8. Il meccanismo focale è di tipo compressivo.

Le zone 913 e 914 risultano dalla scomposizione della fascia che da Parma si estende fino all'Abruzzo. In questa fascia si verificano terremoti con meccanismi focali prevalentemente compressivi nella porzione nord-occidentale e probabilmente distensivi nella porzione più sud-orientale; si possono altresì avere meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo che dissecano la continuità longitudinale delle strutture. L'intera fascia è caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo. Alla zona 913 appartengono tre sorgenti: la sorgente ITIS135 (Neviano degli Arduini) definita con magnitudo Mw pari a 5.4; la sorgente ITIS103 (Crespellano) definita con magnitudo Mw pari a 5.6; la sorgente ITIS091 (Casalecchio di Reno) definita con magnitudo Mw pari a 5.5. A cavallo tra la zona 913 e 914 si trova la sorgente ITIS058 (Loiano) definita con magnitudo Mw pari a 5.3. Nella zona 914 si trova infine la sorgente ITIS093 (Faenza) definita con magnitudo Mw pari a 5.8.

Le sorgenti ITIS135 e ITIS058 appartengono alla struttura composita ITCS027 (Figura 6). Il meccanismo focale medio di queste due zone varia da compressivo a transpressivo.

La zona 915 comprende la dorsale della catena. La fascia che dalla Lunigiana arriva fino al confine Abruzzo-Molise veniva indicata nella precedente zonazione come l'area con il maggior rilascio di energia dell'Appennino centrosettentrionale. Si tratta del settore più interno della catena appenninica, generalmente interessato da importanti faglie primarie e relative sorgenti sismogenetiche. Tali faglie immergono verso NE nel settore compreso tra la Toscana settentrionale e l'Umbria settentrionale. Sono strutture che hanno in genere espressioni superficiali che consentono la caratterizzazione e la quantificazione degli aspetti cinematici mediante i tradizionali approcci geomorfologici e paleosismologici. La zona 915, invece, pur avendo al suo interno le aree della Garfagnana, della Lunigiana e del Mugello, appare complessivamente caratterizzata da tassi di sismicità leggermente inferiori alle altre due zone (919 e 923) che coprono la dorsale.

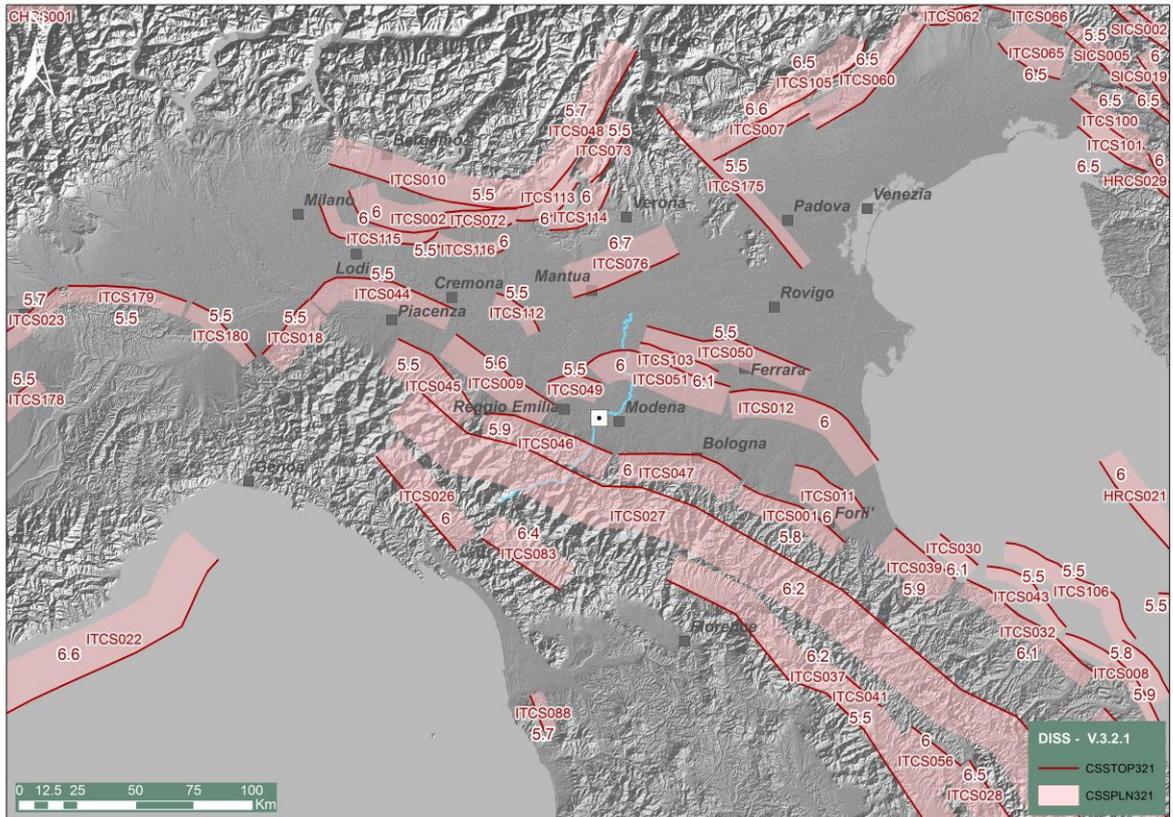


Figura 6. Sorgenti sismogeniche composite tratte da DISS V.3.2.1 (DISS Working Group, 2018) con relativo valore di magnitudo M_w .

Alla zona 915 appartengono sette sorgenti: la sorgente ITIS085 (Pontremoli) definita con magnitudo M_w pari a 5.7; la sorgente ITIS067 (Aulla) definita con magnitudo M_w pari a 5.8, queste due strutture appartengono alla sorgente composita ; le strutture ITIS050 (Garfagnana North) e ITCS083 (Garfagnana) definite entrambe con magnitudo M_w pari a 6.4; le sorgenti ITIS087 (Mugello West) e ITCS086 (Mugello-Città di Castello-Leonessa) con magnitudo M_w rispettivamente di 5.9 e 6.2; la sorgente ITIS076 (Poppi) con magnitudo M_w pari a 5.8. Le prime due sorgenti appartengono alla sorgente composita ITCS026, (Figura 6), le seconde due alla sorgente composita ITCS083 mentre l'ultima appartiene alla sorgente composita e ITCS037. Il meccanismo focale prevalente di questa zona è di tipo distensivo.

La zona 916 coincide con il settore in distensione tirrenica (Meletti et al., 2000). Si tratta di una zona è caratterizzata da una sismicità di bassa energia che sporadicamente raggiunge valori di magnitudo relativamente elevati. Il meccanismo focale medio è di tipo trascorrente.

5.2 Rappresentatività catalogo terremoti

I dati relativi ai terremoti sono stati estratti dal catalogo parametrico CPTI15 3.0 che fornisce informazioni sia macrosismiche che strumentali, relative ai terremoti con intensità massima uguale o superiore a 5 o con magnitudo uguale o superiore a 4 per il territorio Italiano nella finestra temporale 1000-2019 (Rovida et al., 2021).

Il catalogo nella sua versione attuale include l'estensione della copertura temporale della precedente versione CPTI15 2.0 dalla fine 2017 agli anni 2018 e 2019 e include anche l'aggiornamento dei parametri di alcuni terremoti nel periodo luglio 2016-dicembre 2017. Seguendo gli stessi criteri e partendo dagli stessi datasets considerati nelle precedenti versioni, sono stati aggiunti 99 terremoti entro le soglie stabilite per il catalogo nell'intervallo temporale tra il 01.01.2018 e il 31.12.2019.

Nel dettaglio i dati, rispetto a CPTI11 (Rovida et al., 2011), sono stati aggiornati relativamente a:

- a. copertura temporale: estesa a tutto il 2019;
- b. database macrosismico (DBMI15 3.0) di riferimento: aggiornato dati strumentali considerati nuovi e/o rivisti (Locati et al., 2021);
- c. soglie di ingresso dei terremoti: abbassate a intensità massima 5 o magnitudo 4.0 (invece di 5-6 e 4.5 rispettivamente);
- d. determinazione dei parametri macrosismici: basata su una nuova calibrazione dell'algoritmo Boxer;
- e. magnitudo strumentali: comprendono un nuovo insieme di dati e nuove relazioni di conversione.

Il catalogo copre l'intero territorio italiano con porzioni delle aree e dei mari confinanti e contiene 4860 terremoti nella finestra temporale 1000-2019. Il catalogo, quindi, considera e armonizza il più possibile dati di base di diverso tipo e provenienza.

La magnitudo utilizzata è la magnitudo momento (M_w) e in tutti i casi è riportata la relativa incertezza. Tutti i dati e i metodi utilizzati sono accuratamente esplicitati nel catalogo per garantire la massima trasparenza possibile nelle procedure di compilazione. Al pari di CPTI11, il catalogo non è stato declusterato e contiene quindi tutti i foreshocks e le repliche disponibili e conosciuti all'interno delle soglie di magnitudo e intensità considerate.

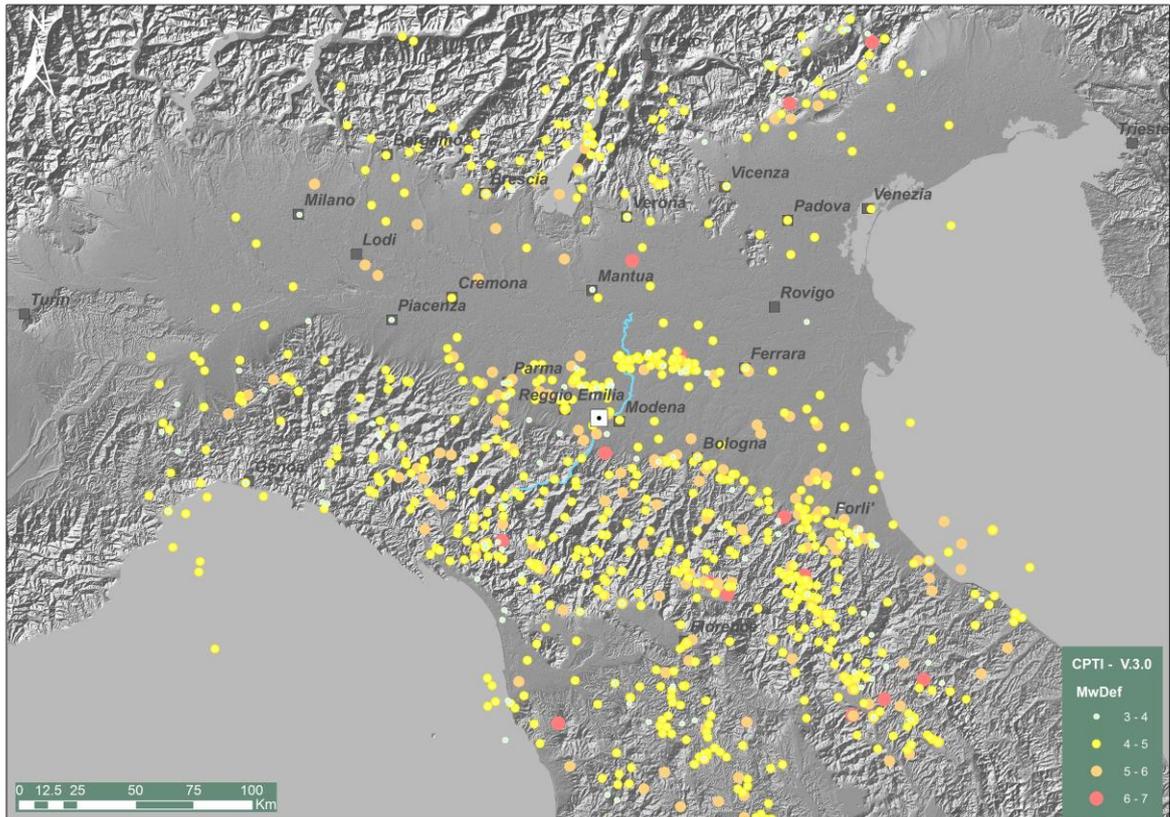


Figura 7 Distribuzione geografica degli epicentri dei terremoti contenuti in CPTI15 ($M \geq 4$) nell'intorno del sito di progetto per classi di magnitudo Mw.

La magnitudo nell'immediato intorno del sito di progetto (Figura 7) raggiunge il valore massimo di 6.05 ed è relativa ad un terremoto del 1501 nella fascia pedeappenninica Modenese.

Il catalogo è stato rielaborato con l'eliminazione degli *aftershock* (operazione di declustering) per ritenere solo eventi principali o in ogni caso eventi che tra di loro, seppur prossimi, non siano direttamente correlabili (Cornell, 1968). I cataloghi sismici reali presentano infatti delle chiare deviazioni da una tipica distribuzione di Poisson (Kagan, 2010) a causa di repliche che si verificano sia nello spazio che nel tempo determinando appunto un raggruppamento degli eventi in cluster spaziotemporali. L'operazione, basata su un metodo consolidato (Gardner and Knopoff, 1974) prevede, di definire finestre di durata (tempo) e apertura (spazio) crescente in funzione della magnitudo dell'evento principale e di rimuovere tutti gli eventi che ricadono in questa finestra.

Nel caso del cluster sismico del terremoto del 2012 l'operazione di declustering riduce un'insieme di più di 40 eventi a poche unità.

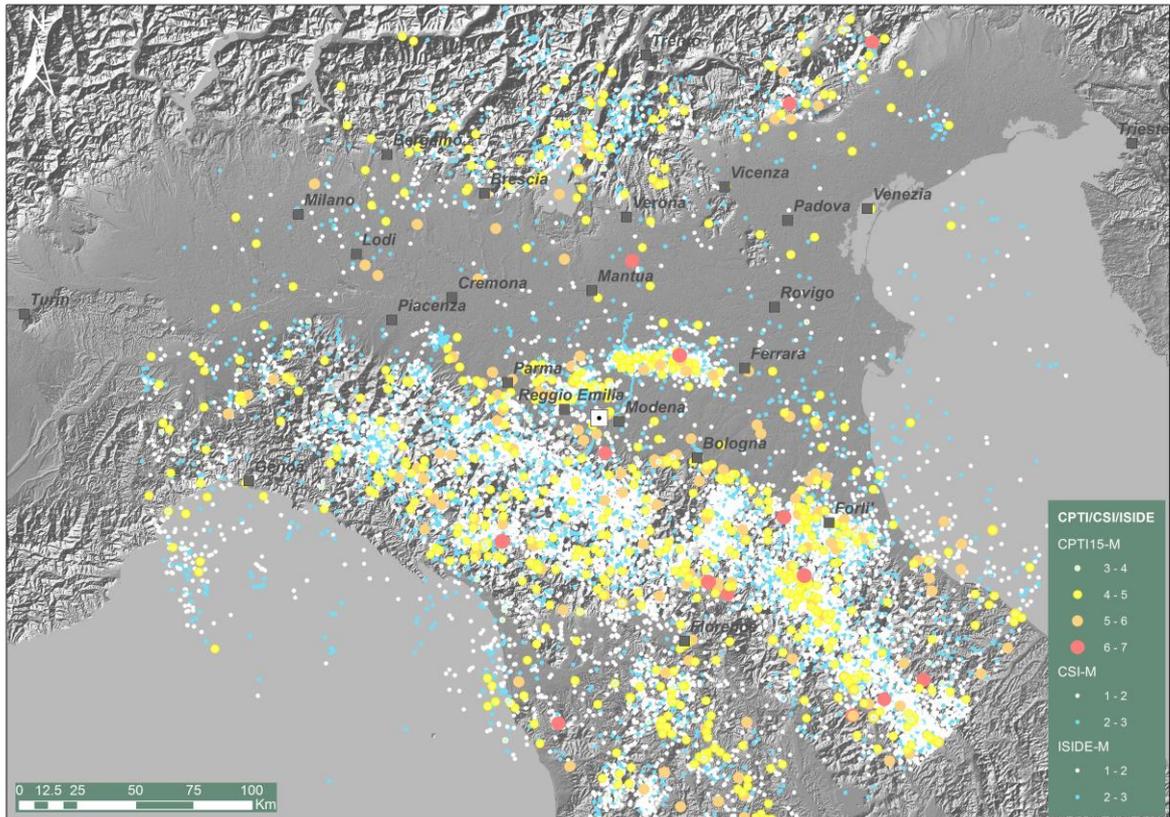


Figura 8 Distribuzione geografica degli epicentri dei terremoti contenuti in CPTI15, in ISIDE ($M < 4$) e in CSI ($M < 4$) nell'intorno del sito di progetto per classi di magnitudo M_w .

Per gli eventi a magnitudo più bassa (< 4) e quindi disponibili solo per il periodo nel quale era in funzione la rete di monitoraggio sismico (Figura 8) sono stati analizzati e rielaborati due cataloghi presenti sul sito dell'INGV ed in particolare il "database parametrico e strumentale della sismicità italiana" (ISIDe Working Group, 2007) con dati a partire dal 1 gennaio 1985 e il "catalogo della sismicità italiana dal 1981 al 2002" (CSI Working Group, 2006).

Per quanto riguarda poi la completezza del catalogo dopo il declustering in letteratura sono proposti diversi metodi (e.g. Stepp, 1972) definendo delle finestre di validità per i diversi intervalli di frequenza (Figura 9) ed in particolare adottando finestre temporali via via crescenti all'aumentare del valore centrale dell'intervallo di magnitudo. Nella scelta delle finestre, per gli scopi del presente studio, sono stati adottati, pressochè integralmente, gli intervalli di completezza definiti su base statistica dal gruppo di lavoro CPTI15.

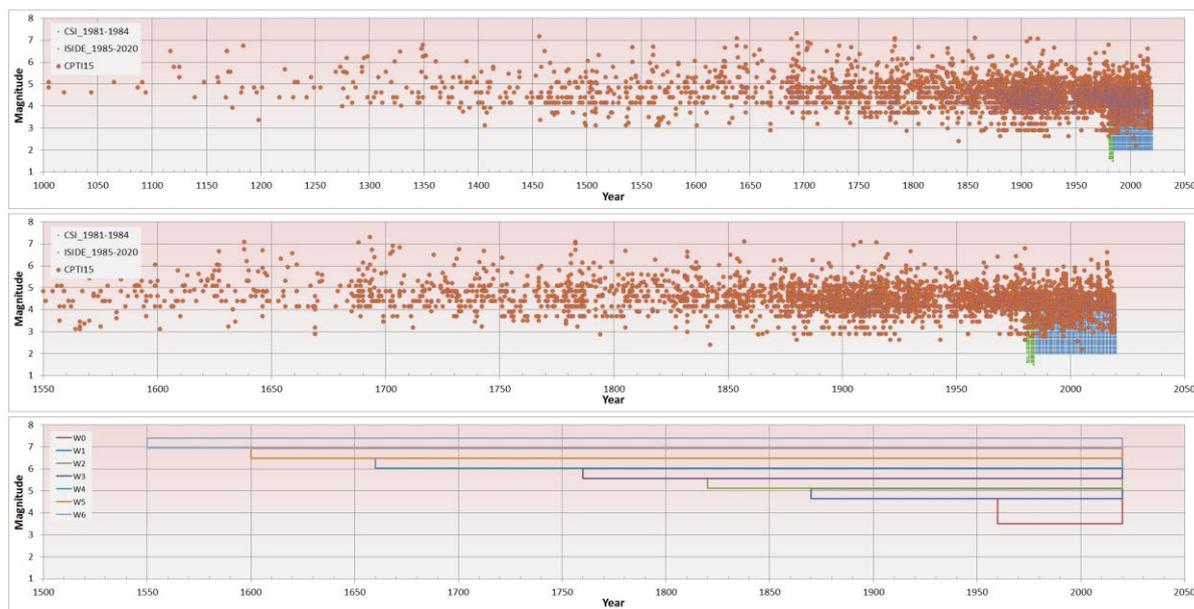


Figura 9 Catalogo dei terremoti completo (sopra) e dettaglio dell'intervallo temporale 1550-2020 (centro) con le finestre di analisi proposte per i diversi intervalli di magnitudo (sotto).

5.3 Tasso di sismicità

Il codice R-CRISIS (Ordaz et al., 2015), impiegato per la simulazione, utilizza il modello di sismicità modificato di Gutenberg - Richter (GR). Per ogni zona sismica (o per ogni struttura tettonica nel caso siano state inserite le singole sorgenti sismogenetiche) sono da definire in *input* i seguenti parametri:

- la magnitudo soglia M_0 ;
- il numero di terremoti N che, nell'unità di tempo superano la magnitudo soglia;
- il valore atteso del parametro b della relazione di GR definite in termini del suo logaritmo naturale;
- la deviazione standard del parametro b della relazione GR;
- il numero di magnitudo da utilizzare per il calcolo della pericolosità.

Sono state considerate le ZS 912 e 913.

I dati di magnitudo dei terremoti relativi alle due zone 912 e 913 sono stati raggruppati per classi di magnitudo nelle finestre di completezza dei cataloghi utilizzati. Per i bassi valori di magnitudo che sono comunque meno significativi per la determinazione dei parametri a e b sono stati integrati anche i dati strumentali recenti in una finestra temporale addizionale dal 1985 al 2020.

Dopo aver costruito il grafico (Figure 10) $\log N(M)-M$ è stato applicato il metodo della massima verosimiglianza (MLE – *Maximum Likelihood Estimation*) per la migliore approssimazione della curva.

Il numero ridotto di osservazioni, rispetto alle finestre definite sul catalogo, aumenta notevolmente il grado di incertezza nella determinazione del parametro b. Al fine di migliorare l'analisi sono stati considerati anche diversi di magnitudo soglia.

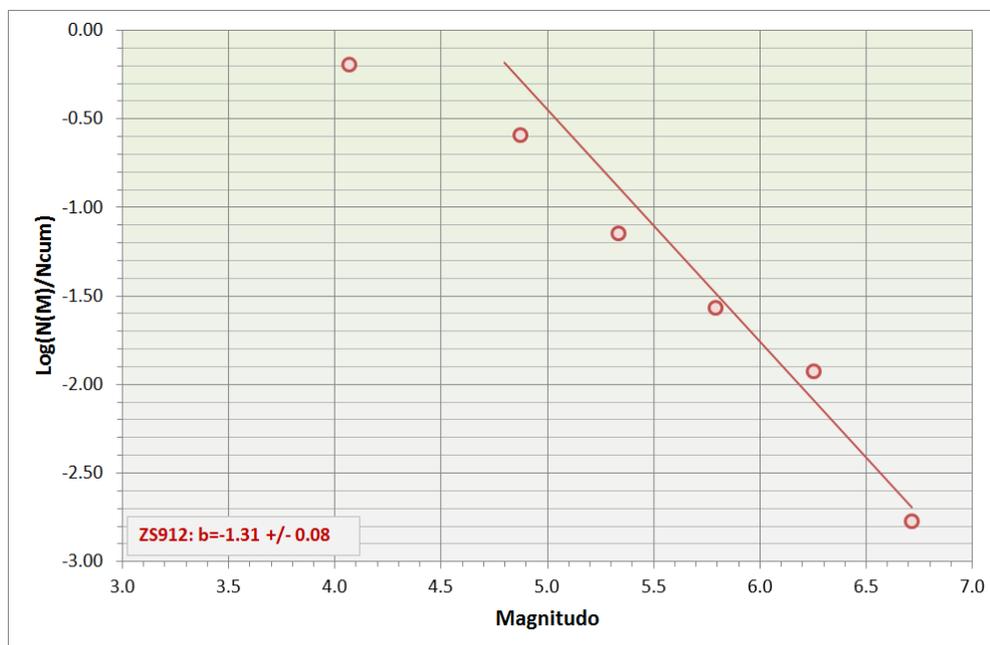


Figura 10 Grafico "Magnitudo – Log(N(M)/Ncum)" per la zona 912.

Il parametro b così determinato ed utilizzato per il calcolo è pari a -1.31 ± 0.08 nella zona 912 e di -1.51 ± 0.12 per la zona 913. I valori sono confrontabili con quelli utilizzati per lo studio di pericolosità sismica nazionale (Stucchi et al., 2004) incrementandone la rappresentatività in virtù dell'allungamento della finestra temporale del catalogo sismico.

5.4 Magnitudo massima

La stima della magnitudo massima è stata fatta utilizzando i dati della zonazione sismogenetica ZS9, (MPS Working Group, 2004), il database delle sorgenti sismogenetiche DISS v.3.2.1 (DISS Working Group, 2018) e il catalogo dei terremoti CPTI15 v.3.0 (Rovida et al., 2021).

Ad ulteriore conforto dei dati disponibili sono state anche utilizzate delle relazioni empiriche (Wells and Coppersmith, 1994) per il calcolo della magnitudo (cfr. Eq. 1).

$$M = 4.07 + 0.98 \cdot \log(RA); \quad (1)$$

RA (*Rupture Area*) rappresenta l'area di rottura definita per le singole sorgenti sismogenetiche nel database DISS.

5.5 Leggi di attenuazione

R-CRISIS propone diversi modelli di attenuazione (GMPM - *Ground Motion Prediction Model*) attraverso l'utilizzo di equazioni (GMPE - *Ground Motion Prediction Equation*) disponibili in letteratura e già implementate all'interno del codice. Per il calcolo della PGA (picco di accelerazione orizzontale) e delle ampiezze dei diversi periodi del moto (ordinate spettrali) sono disponibili in R-CRISIS più di 50 equazioni di attenuazione e altre relazioni definite dall'utilizzatore essere facilmente aggiunte a quelle preimpostate.

Oltre ai parametri specifici di ciascuna GMPE (come ad esempio il tipo di fagliazione o la V_{S30} , quindi il tipo di suolo) vi sono due parametri ulteriori definiti "*Units coefficient*" e "*Sigma truncation*" che consentono di modificare le unità di misura del modello e di troncatura la distribuzione del moto del suolo ad un numero fisso (ε) di deviazione standard (σ) per rendere la stima dello scuotimento più verosimile.

La scelta della relazione di attenuazione più adatta dipende per lo più dal modello geologico (regionalità), dalla distanza considerata (sorgente-sito), e dall'intervallo di frequenza del treno d'onda considerato. Per il sito di progetto sono state utilizzate tre equazioni GMPE (Figura 11) già implementate in R-CRISIS:

Relazione GMP1 (Bindi et al., 2011) che considera i seguenti parametri principali:

- Intervallo di magnitudo M_w : 4.0-6.9;
- Intervallo di distanza epicentrale: 0.1-200 km;
- Intervallo di periodi spettrali: 0.0-4.0 s.
- Relazione GMP2 (Cauzzi et al., 2015) che considera i seguenti parametri principali:
- Intervallo di magnitudo M_w : 4.5-8.0;
- Intervallo di distanza epicentrale: 0-150 km;
- Intervallo di periodi spettrali: 0.0-10.0 s.

Relazione GMP3 (Bindi et al., 2017) che considera i seguenti parametri principali:

- Intervallo di magnitudo M_w : 3.0-8.0;
- Intervallo di distanza epicentrale: 0.1-300 km;
- Intervallo di periodi spettrali: 0.0-4.0 s.

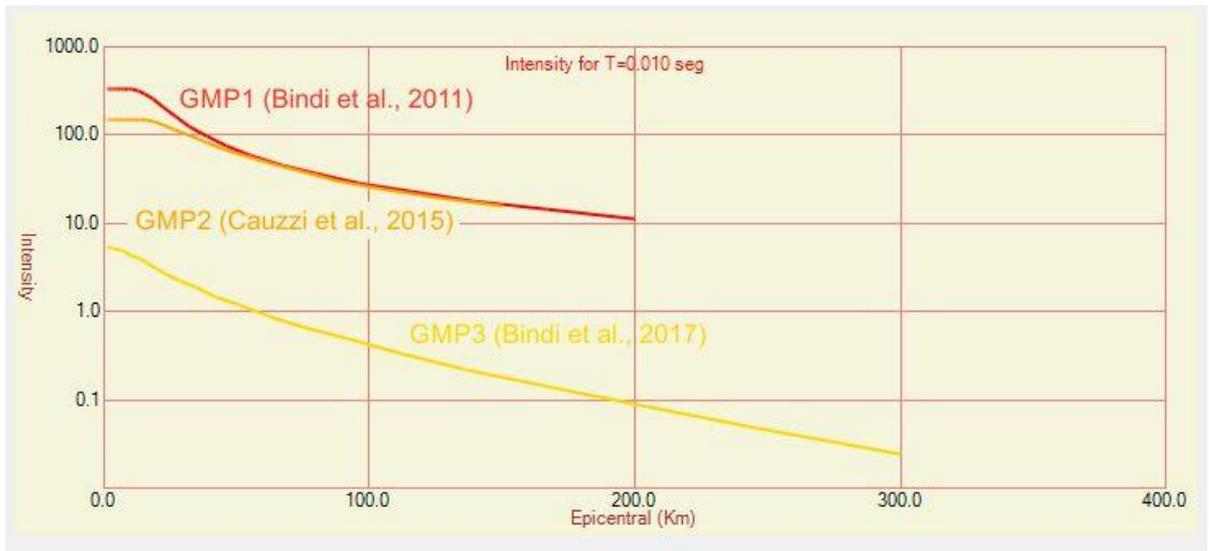


Figura 11 Grafico "intensità - distanza epicentrale" per le tre relazioni di attenuazione utilizzate nella simulazione.

5.6 Schematizzazione albero logico

Gli scenari di pericolosità sismica considerati nell'albero logico (Figura 12) sono stati elaborati simulando la PGA e gli spettri di accelerazione per diversi periodi di ritorno corrispondenti ai diversi stati limite considerati per un periodo di riferimento V_R di 150 anni e probabilità di eccedenza rispettivamente del 5%, del 10% e del 63%.

Il tipo di suolo, per il quale sono state effettuate le elaborazioni, è di categoria A che corrisponde (secondo i dettami delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018) ad un parametro $V_{s30} > 800$ m/s (suolo roccioso, ndr).

Per la zonazione sismotettonica e la completezza del catalogo dei terremoti la simulazione si è basata sui dataset prodotti da INGV per la mappa di pericolosità sismica nazionale aggiornati sulla base degli studi più recenti. Il coefficiente di peso per entrambi i rami assume quindi il valore di 1.0.

Il tasso di sismicità è stato stimato direttamente dal catalogo dei terremoti definendo sperimentalmente i parametri a e b della relazione GR attraverso il metodo ML. L'incertezza sul valore di b è stata inserita nel calcolo definendo due rami dell'albero logico di pari peso. I coefficienti di peso sono stati quindi definiti a 0.6 per il ramo principale e a 0.2 per ciascuno dei due rami che considerano la deviazione di tale parametro in senso positivo o negativo.

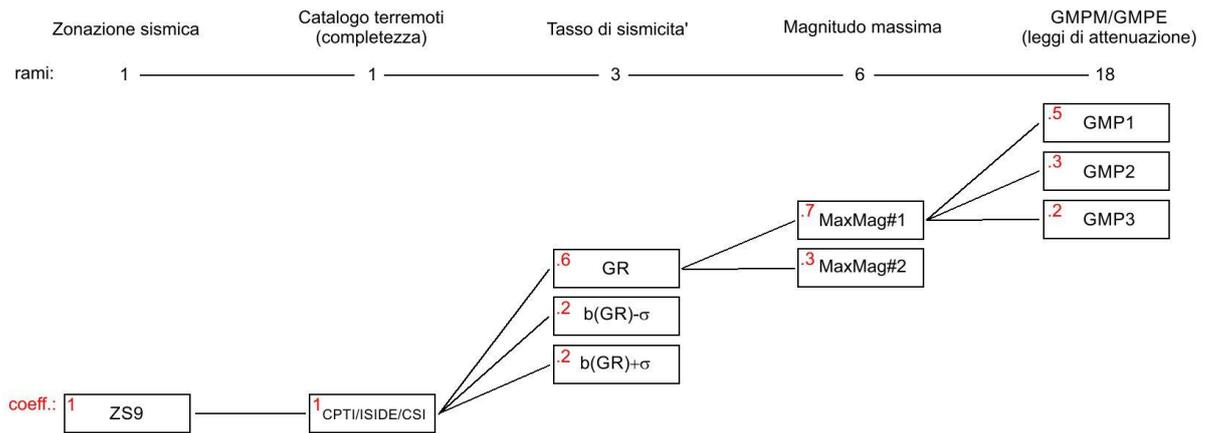


Figura 12 Schema dell'albero logico, con i relativi coefficienti di peso, utilizzato per la stima della pericolosità sismica presso il sito di progetto.

Per il valore della magnitudo massima M_{max} è stata considerata anche la relativa deviazione standard e vista l'incertezza insita nella determinazione del parametro è stato aggiunto un secondo ramo. Il coefficiente di peso sul primo ramo è stato impostato a 0.7 mentre sul ramo con valore di M_{max} eccedente è stato assegnato un coefficiente di peso pari a 0.3

Per quanto riguarda infine i modelli di attenuazione del moto del suolo è stata considerata maggiormente significativa la GMP1 in quanto essa si basa su dati nazionali, mentre alla GMP2 ed alla GMP3 sono stati assegnati dei coefficienti peso rispettivamente di 0.3 e di 0.2. Nella simulazione numerica vengono considerate anche le incertezze delle equazioni di predizione del moto del suolo.

Come già anticipato gli spettri UHR e le curve pericolosità sono state stimate con il codice R-CRISIS v.20.1.1 (Ordaz et al., 2015; 2017) inizialmente sviluppato con il supporto di II-UNAM (Istituto de Ingeniería at UNAM, México) ed in parte anche dal Dipartimento della Protezione Civile Nazionale Italiana attraverso l'INGV. Allo sviluppo del codice hanno contribuito anche ricercatori dell'INGV.

5.7 Risultati delle simulazioni PSHA

5.7.1 Moto orizzontale del suolo

La curva di PGA per diverse probabilità di eccedenza (Figura 13) restituisce i valori della componente orizzontale pari rispettivamente a 0.334g, 0.283g e 0.139g per le tre condizioni SLC (Pe 5%), SLV (Pe 10%) e SLD (Pe 63%) che corrispondono a T_R di 2475, 1525 e 151 anni.

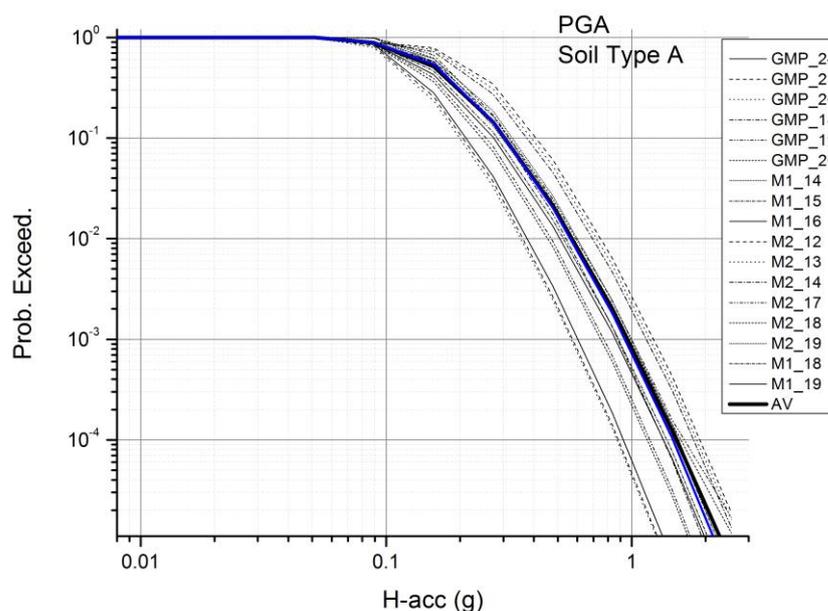


Figura 13 Valori di PGA (moto orizzontale) per diverse probabilità di eccedenza per il sito di progetto. In tratto blu la linea del 50 percentile mentre in tratto nero grosso il valore medio (AV).

Le diverse curve presenti nel grafico corrispondono ai 18 scenari simulati con R-CRISIS modificando di volta in volta i parametri di calcolo indicati nei diversi rami dell'albero logico.

Per quanto riguarda gli spettri UHRS (Figura 14), essi vengono restituiti per le tre condizioni SLC (Pe 5%), SLV (Pe 10%) e SLD (Pe 63%) che corrispondono a T_R di 2475, 1525 e 151 anni previste dalla normativa. Si notano le curve relative ai diversi scenari simulati con la relativa dispersione. Oltre alle diverse curve, una per scenario, è stata riportata, a tratto grosso) la curva media (indicata con AV nelle diverse figure) ottenuta applicando i coefficienti di peso di cui ai precedenti paragrafi.

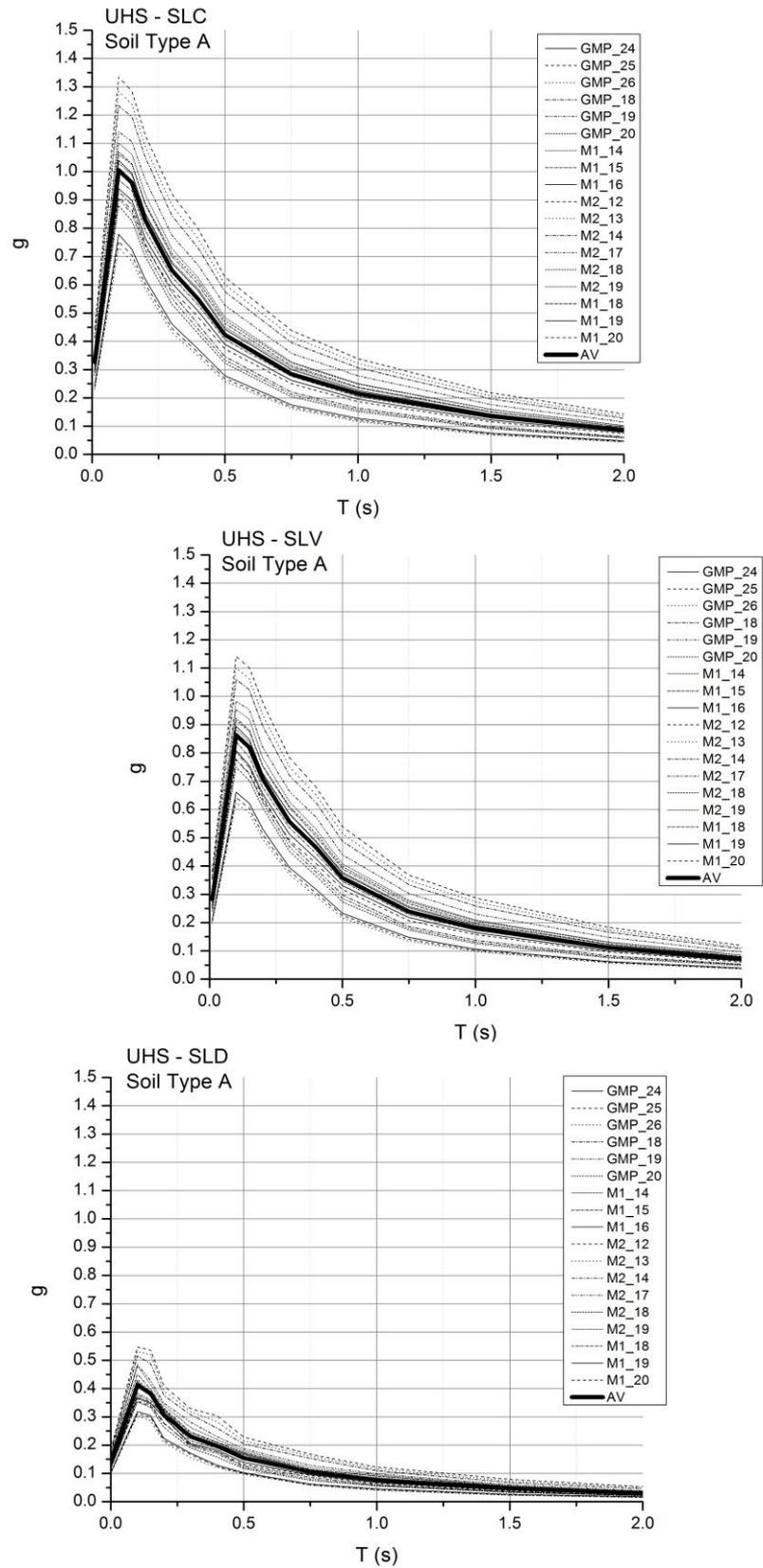


Figura 14 Spettri UHRS per i tre scenari di T_R considerati nella simulazione (SLC, SLV e SLD) e previsti dalla normativa per il moto orizzontale del suolo al sito di progetto.

Le tre curve di sintesi (Figura 15) presentano valori di picco rispettivamente di circa 1.00g, 0.85g e 0.41g per i tre tempi di ritorno T_R considerati.

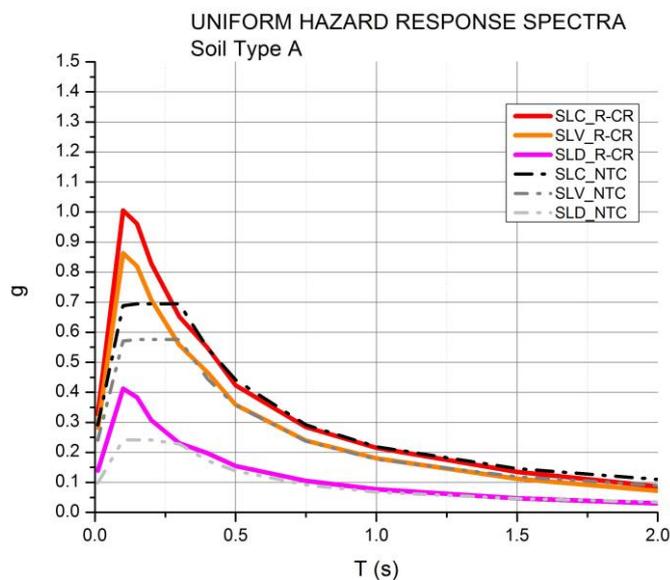


Figura 16 *Sinopsi degli UHRS per il moto orizzontale nel sito di progetto così come determinati dalle simulazioni PSHA. A linea punto-tratto sono rappresentati anche gli spettri di normativa*

5.7.2 Moto verticale del suolo

La curva di PGA per diverse probabilità di eccedenza (Figura 17) restituisce valori della componente verticale pari rispettivamente a 0.216g, 0.174g e 0.070g per le tre condizioni SLC (Pe 5%), SLV (Pe 10%) e SLD (Pe 63%) che corrispondono a T_R di 2475, 1525 e 151 anni.

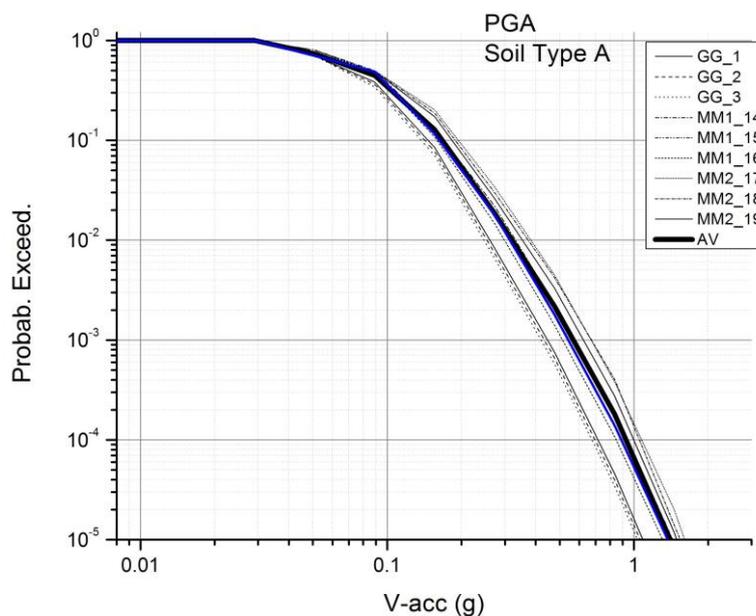


Figura 17 *Valori di PGA (moto verticale) per diverse probabilità di eccedenza per il sito di progetto. In tratto blu la linea del 50 percentile mentre in tratto nero grosso il valore medio (AV).*

I valori di accelerazione verticale sono richiesti solo per alcune opere particolari.

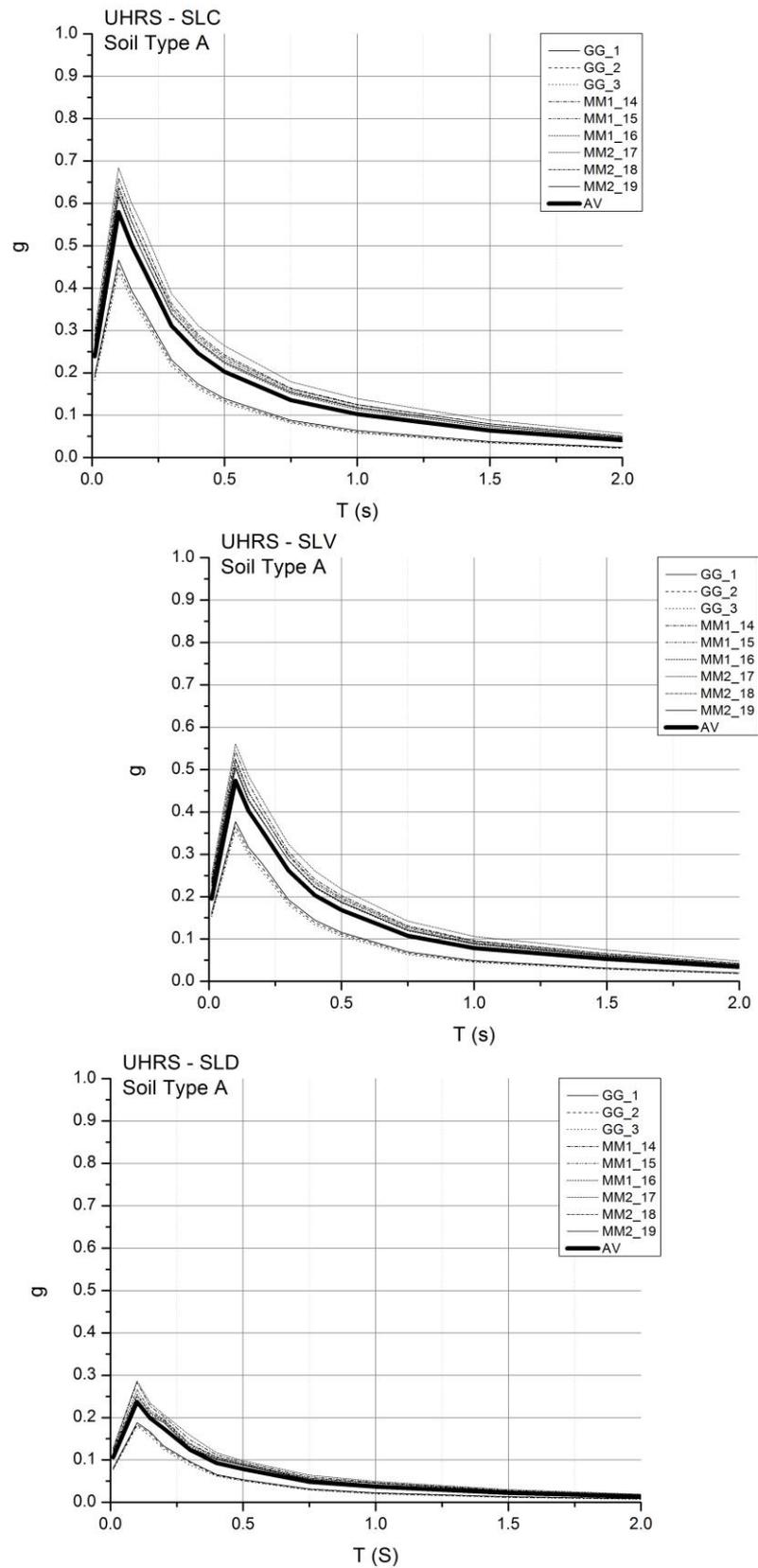


Figura 18 Spettri UHRs per i tre scenari di T_R considerati nella simulazione (SLC, SLV e SLD per il moto verticale del suolo al sito di progetto).

Nella pratica corrente lo spettro verticale si determina applicando un coefficiente di scala che varia da 0.55 a 0.66 allo spettro orizzontale. Si tratta ovviamente di una semplificazione in quanto tale approccio è frequenza-invariante mentre il treno d'onde policromatico generato da un sisma, nella sua componente *body* (onde longitudinali e trasversali), durante la propagazione subisce fenomeni differenziati di partizione di energia, di attenuazione per fattore geometrico e per assorbimento nelle componenti trasversali e longitudinali.

Le tre curve di sintesi (Figura 16) presentano valori di picco rispettivamente di circa 1.00g, 0.85g e 0.41g per i tre tempi di ritorno T_R considerati.

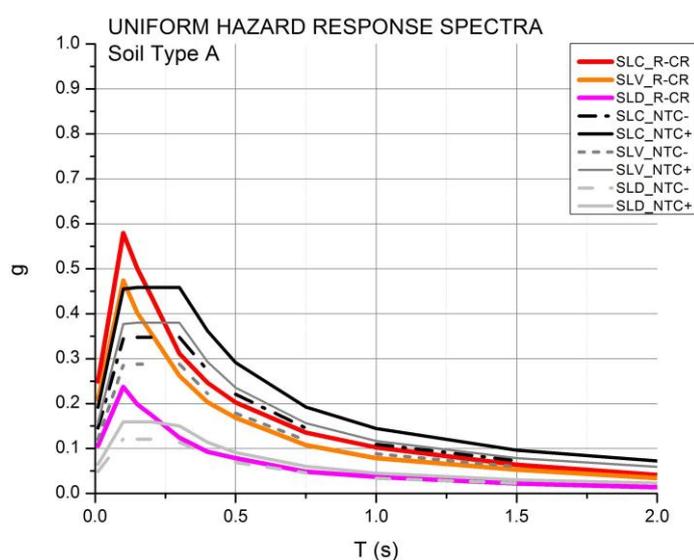


Figura 19

Sinopsi degli UHRS per il moto verticale nel sito di progetto così come determinati dalle simulazioni numeriche. Sono riportati anche gli spettri orizzontali a min/max scalatura (1/2H-2/3H).

6 Analisi della sismicità storica e delle sorgenti sismogenetiche

I valori di intensità attesi al sito di progetto per la sismicità storica sono stati stimati sulla base dei dati presenti nel catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2021). I terremoti che si sono verificati nell'intorno del sito sono stati classificati sulla base dei consolidati criteri "Magnitudo-Distanza" (M-D) ed è stato costruito un grafico di sintesi. Sono stati considerati solo i terremoti con magnitudo M maggiore uguale a 4 mentre i terremoti di magnitudo inferiore sono stati considerati solo per una distanza inferiore a 5 km dal sito di progetto.

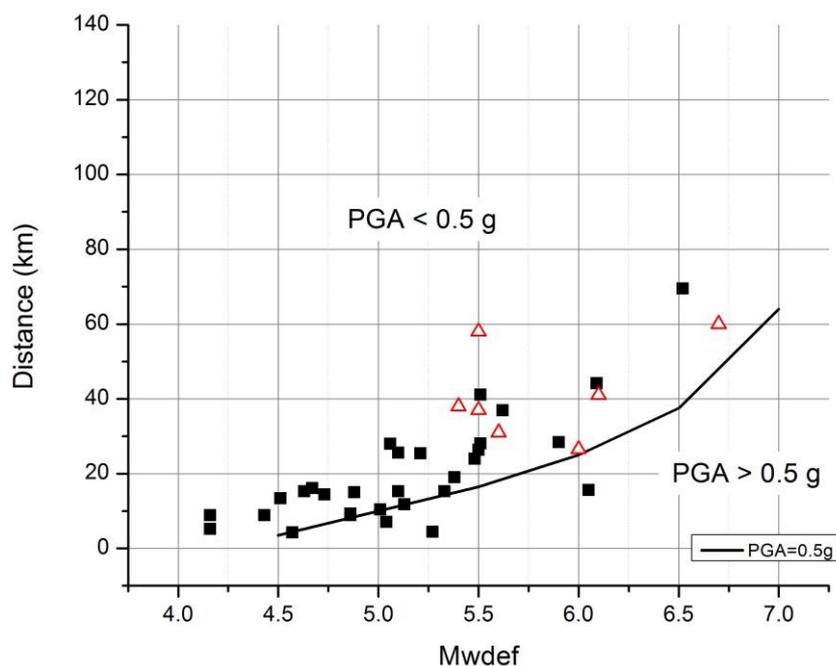


Figura 20 *Classificazione schematica dei terremoti verificatisi nell'intorno del sito di progetto con magnitudo $M > 4$ e classificati per le diverse distanze. La linea nera corrisponde al valore di PGA per un P_R di 50 anni ed un T_R di 30 anni ($Pe81\%$, SLO) calcolata secondo una delle relazioni di attenuazione implementate in R-CRISIS più vicine alle caratteristiche geologiche dell'intorno del sito di progetto (Bindi et al., 2011). I triangoli rossi corrispondono alle sorgenti sismogenetiche del DISS.*

Per meglio guidare la scelta è stata calcolata la curva di intensità pari a 0.50 g (su suolo di tipo A), che corrisponde allo raro limite SLO per un P_R di 50 anni, utilizzando una delle relazioni di attenuazione disponibili in letteratura (Figura, 20).

Sempre ai fini di valutare quale sia stato l'effetto dei terremoti storici al sito di progetto e sempre avvalendosi delle relazioni di attenuazione disponibili in R-CRISIS e maggiormente adatte all'assetto geologico e sismo-tettonico nell'area circostante il sito, sono state calcolate e diagrammate le PGA per i terremoti storici di $M > 4.5$ (Figura 21). Sono stati analizzati un totale di 31 eventi ai quali nel calcolo è stata anche aggiunta l'incertezza di nella determinazione della magnitudo riportata nel catalogo. L'attenuazione è stata calcolata con due diverse relazioni valide rispettivamente per l'area europea (Akkar and Bommer, 2010) e per quella Italiana (Bindi et al., 2011).

Le PGA stimate al sito risultano essere moderatamente significative in special mode se si considera l'incertezza nel calcolo della magnitudo M. Il terremoto del 1501, di M pari a 6.05 e distante 15.5 km, considerando la componente in eccesso della deviazione standard determina un valore di accelerazione superiore a 0.10g. Il terremoto del 1671, di M pari a 5.27 e distante 4.4 km, considerando la componente in eccesso della deviazione standard determina un valore di accelerazione superiore a 0.15g

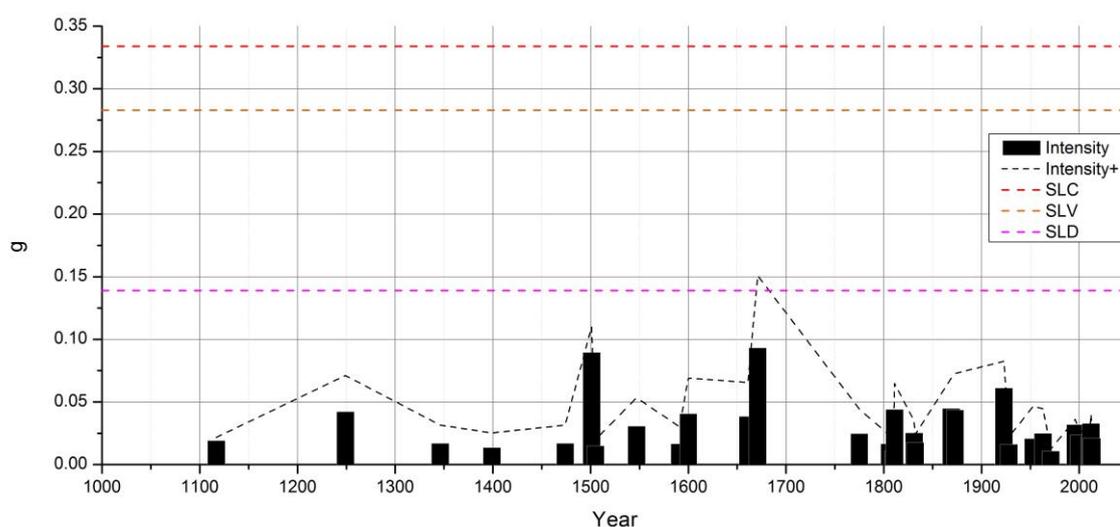


Figura 21 PGA calcolata al sito di progetto su suolo di tipo A per i terremoti con $M > 4$ presenti nel catalogo CPTI e ubicati nell'intorno del sito di progetto. Le linee tratteggiate magenta, arancio e rosso corrispondono alla PGA degli stati SLD, SLV e SLC per un P_R di 150 anni. La linea a tratteggio rappresenta la componente in eccesso determinata dall'incertezza positiva nella determinazione della magnitudo.

Dall'analisi della distribuzione spaziale degli eventi in funzione di distanza dal sito e della relativa PGA causata al sito si evidenzia come il contributo più significativo sia quello degli eventi collocati in un raggio di 20 km (Figura 22). La PGA è stata calcolata sempre considerando la componente in eccesso della deviazione standard.

Data evento (yyyy-mm-dd)	Distanza epicentrale (km)	M	M+	PGA (g)	PGA+ (g)
1501-06-05	15.6	6.05	6.24	0.089	0.109
1671-06-20	4.4	5.27	5.85	0.093	0.151
1923-06-28	7.1	5.04	5.32	0.061	0.082

Tabella 2: Valori massimi di PGA+ attesa al sito per alcuni terremoti storici del catalogo CPTI15.

Sorgente DISS	Distanza epicentrale (km)	M	M+	PGA (g)	PGA+ (g)
ITIS140	60	6.7	nd	0.029	nd
ITIS107	27	6.0	nd	0.041	nd
ITIS134	41	6.1	nd	0.024	nd
ITIS090	58	5.5	nd	0.006	nd
ITIS103	31	5.6	nd	0.020	nd
ITIS091	37	5.5	nd	0.013	nd
ITIS135	38	5.4	nd	0.011	nd

Tabella 3: Valori di PGA attesa al sito per le sorgenti sismogenetiche del DISS V.3.2.1.

Si notano ancora gli eventi del 1501, del 1671 e anche quello del 1923 che determinano PGA massime da appena inferiori a 0.1g a superiori a 0.15g (Tabella 2).

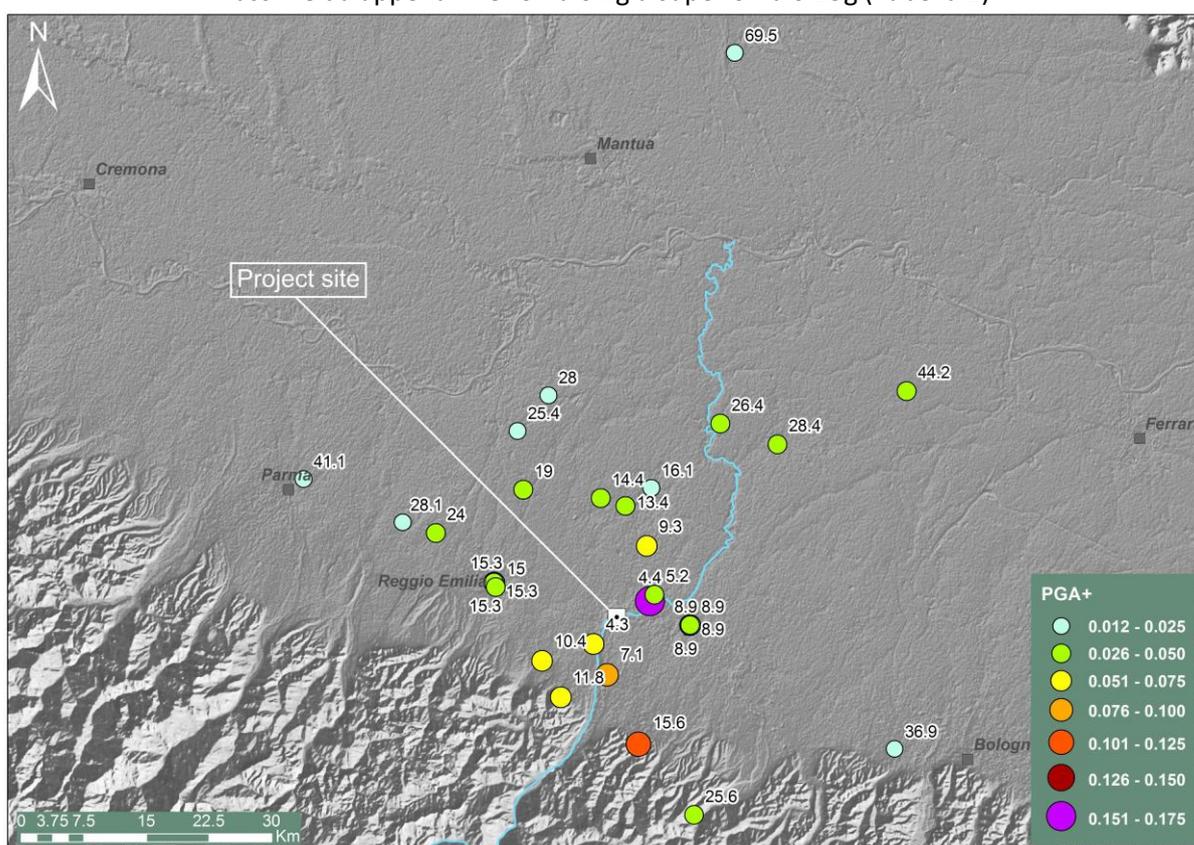


Figura 22 PGA calcolata al sito di progetto su suolo di tipo A, inclusa l'eccedenza positiva determinata dall'incertezza nella stima di M, determinata da terremoti storici verificatisi in vicinanza del sito di progetto. Le distanze sono espresse in km mentre la PGA è espressa in g.

Con il medesimo approccio e sempre avvalendosi del codice R-CRISIS sono state analizzate le sorgenti catalogate nel DISS V.3.2.1 (Tabella 3). La PGA causata al sito in funzione della magnitudo M

e della distanza è nel complesso modesta. La sorgente che determina la PGA massima è la ITIS107 (Mirandola, cfr Figura 5) il cui valore corrisponde a 0.041g.

Sono poi da segnalare la ITIS140 (Veronese) e la ITIS134 (Finale Emilia) che, in funzione di magnitudo attesa e distanza, possono determinare PGA pari rispettivamente a 0.029g e 0.024g.

7 Elaborazione di accelerogrammi naturali per la rsl

7.1 Tipologia degli accelerogrammi

Per l'analisi di risposta sismica locale (RSL) sono stati selezionati ed elaborati una serie di accelerogrammi di terremoti reali (detti accelerogrammi naturali – AN) in modo da renderli spettrocompatibili con gli spettri probabilistici ottenuti dalle simulazioni PSHA per il sito di progetto. In particolare sono stati costruiti tre insiemi di accelerogrammi per i tre stati limite considerati: SLD ($P_R=150$ anni, $T_R=150$ anni, $P_{VR}=63\%$), SLV ($P_R=150$ anni, $T_R=1425$ anni, $P_{VR}=10\%$) e SLC ($P_R=150$ anni, $T_R=2475$ anni, $P_{VR}=5\%$).

Gli AN sono preferibili a quelli sintetici in quanto essi sono una rappresentazione realistica dello scuotimento del suolo in quanto hanno forme d'onda caratteristiche in termini di tempo totale, ampiezza e frequenza delle fasi costituenti.

Le indicazioni e le norme prevedono anche la scalatura in ampiezza degli accelerogrammi purché la forma spettrale non si modifichi sostanzialmente e proprio per operare in tal senso si suggerisce di limitare i fattori di scalatura. Non sempre è comunque possibile disporre di AN la cui forma spettrale sia facilmente sovrapponibile a quella dello spettro-target definito mediante procedure di valutazione di pericolosità con metodo probabilistico (PHSA) e/o deterministico (DHSA).

Gli AN da selezionare devono quindi rispettare dei criteri di compatibilità con lo spettro-target, questi criteri sono solitamente più stringenti per l'analisi di strutture mentre consentono una maggiore flessibilità negli studi di RSL.

Gli AN presenti nelle banche dati sono disponibili per le tre componenti di oscillazione delle quali due sono orizzontali orientate ortogonalmente (solitamente indicate come E-O e N-S) ed una è verticale (solitamente indicata con Z o V). Gli AN sono accessibili in forma grezza (*raw*) oppure pre-elaborata (e.g. Paolucci et al., 2011).

7.2 Procedure di disaggregazione e scelta dei cluster magnitudo-distanza

Nella scelta delle finestre degli accelerogrammi naturali si è preferito analizzare direttamente la distribuzione integrando le informazioni della disaggregazione M-D risultante dalle simulazioni probabilistiche PSHA. Il grafico M-D dei terremoti naturali verificatisi in vicinanza del sito evidenzia come l'area sia chiaramente dominata da tre cluster (Figura 21) la cui magnitudo centrale è indicativamente 5.5, 6.0 e 6.5. Le finestre sono state quindi definite nell'intorno di questa magnitudo centrale.

Per la condizione SLD ($T_R=150$ anni) è stato selezionato un tipo-terremoto di magnitudo medio-moderata: $M_w = 5.0 \pm 0.5$ entro una distanza epicentrale di 30 km.

Per la condizione SLV ($T_R=1425$ anni) è stato selezionato un tipo-terremoto di magnitudo per lo più medio-alta: $M_w = 5.9 \pm 0.5$ entro una distanza epicentrale di 20 km.

Per la condizione SLC ($T_R=2475$ anni) è stato selezionato un tipo-terremoto di magnitudo da medio-alta ad alta: $M_w = 6.4 \pm 0.5$ entro una distanza epicentrale di 20 km.

La scelta deve essere poi guidata dallo stile sismo-tettonico dell'area da studiare ed in particolare la cinematica delle faglie dovrebbe essere possibilmente simile a quella delle strutture sismogenetiche che si trovano in vicinanza del sito di progetto.

7.3 Fonti degli AN

Gli AN sono stati estratti dalle banche dati rese disponibili online dai vari Enti/Associazioni che mantengono ed aggiornano periodicamente questi insiemi di dati.

In particolare, sono state consultati:

PEER - Ground Motion Database

NGA-West2 -- Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes

<https://ngawest2.berkeley.edu/>

K-NET / KIK-NET - Strong Motion Seismograph Network

<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/>

ESM – Engineering Strong Motion Database

<https://esm-db.eu/#/home>

ITACA - ITalian ACcelerometric Archive

http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_31/#/home

Gli accelerogrammi sono forniti in formato *raw-unscaled* ma, come anticipato, possono essere anche pre-elaborati e in alcuni siti sono disponibili anche i codici per la scalatura.

Nella scelta degli accelerogrammi naturali per i diversi intervalli di magnitudo e per le diverse distanze epicentrali si è preferito consultare esclusivamente stazioni ubicate su suoli di classe A. La classe del suolo per le diverse stazioni è stata attribuita sulla base di criteri geologici (substrato

affiorante) oppure di criteri geofisici ($V_{s30} > 800$ m/s). Gli altri criteri di scelta hanno riguardato la combinazione M-D e, ove disponibile, la cinematica della faglia sorgente.

7.4 Procedure di elaborazione e scalatura

Per l'elaborazione degli AN in termini di spettro-compatibilità è stato utilizzato il codice In-Spector V.1.0b (Acunzo et al., 2014). Il codice consente di importare uno spettro di riferimento o spettro-target (nel caso del presente rapporto si tratta di quello ottenuto dall'analisi PSHA definito per un suolo di classe A) e di scalare gli AN sulla base della forma spettrale target.

Dopo aver importato un insieme di AN viene selezionato, come da indicazioni di normativa, un gruppo di 7 segnali di base da utilizzare in input per lo studio di RSL.

La scelta è guidata dal fattore di scala (nel gruppo da analizzare vanno preferiti gli AN con il fattore di scala più basso) e dalla limitazione del parametro D_{rms} che in In-Spector rappresenta un fattore di forma e quantifica lo scarto tra spettro-target e spettro-sorgente scalato nel campo dei periodi di interesse. Un altro aspetto riguarda la limitazione degli accelerogrammi provenienti da un dato evento/stazione di registrazione. Vanno infine analizzati altri parametri del moto sismico come la durata e la nota intensità di Arias (rielaborazione dell'intensità di Housner)

L'ultima fase di analisi riguarda la verifica di spettro-compatibilità *strictu sensu* e cioè il confronto tra lo spettro medio dei 7 accelerogrammi e lo spettro-target. La zona di convergenza tra spettro-medio e spettro-target è solitamente definita in una fascia compresa tra il 30% in eccesso ed il 10% in difetto rispetto allo spettro-target. Nel caso in cui lo scarto sia significativo si può intervenire direttamente sui fattori di scala (SF) dei singoli accelerogrammi.

7.4.1 Selezione AN per lo Stato Limite di Danno - SLD

Per l'analisi di SLD sono stati analizzati 15 eventi sismici verificatisi in area europea e per ciascuno è stata analizzata la risposta dei due sensori orizzontali per un totale di 28 accelerogrammi.

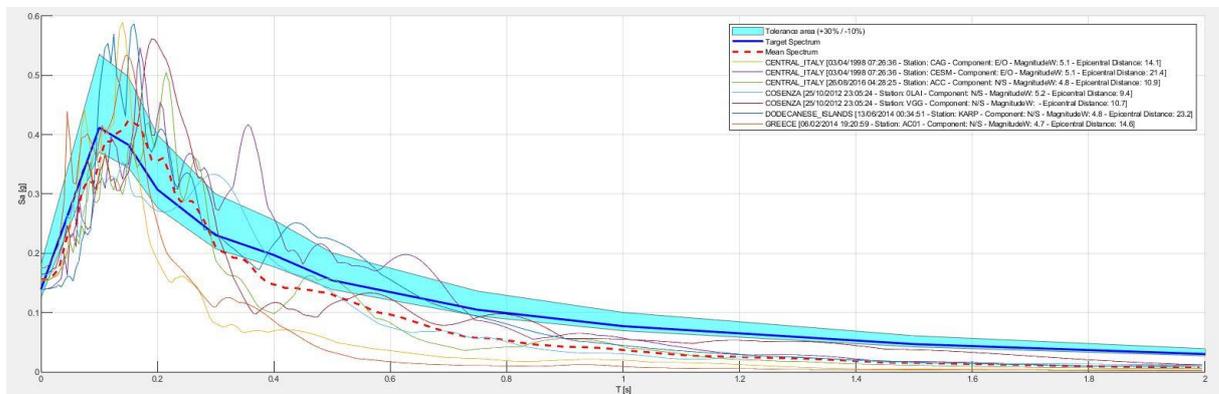


Figura 23 Insieme dei 7 accelerogrammi scalati in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLD. In linea blu è visibile lo spettro-target e l'area di convergenza +30% / -10% è indicata con la campitura azzurra.

Gli AN sono stati pre-scalati utilizzando come fattore di aggancio la PGA e successivamente, attraverso l'analisi del parametro D_{rms} , disponibile in In-Spector, secondo i criteri definiti al par. 5.4, gli AN sono stati ridotti a 7 (Figura 23 e Figura 24). Nel complesso lo spettro medio, per lo meno per il segmento di periodo sino a 0.3 s, ricade all'interno dell'area di convergenza. Variando SF si poteva ottenere una migliore convergenza ma si è preferito non scalare eccessivamente gli accelerogrammi per minimizzare il *trade-off* tra scalatura e convergenza.

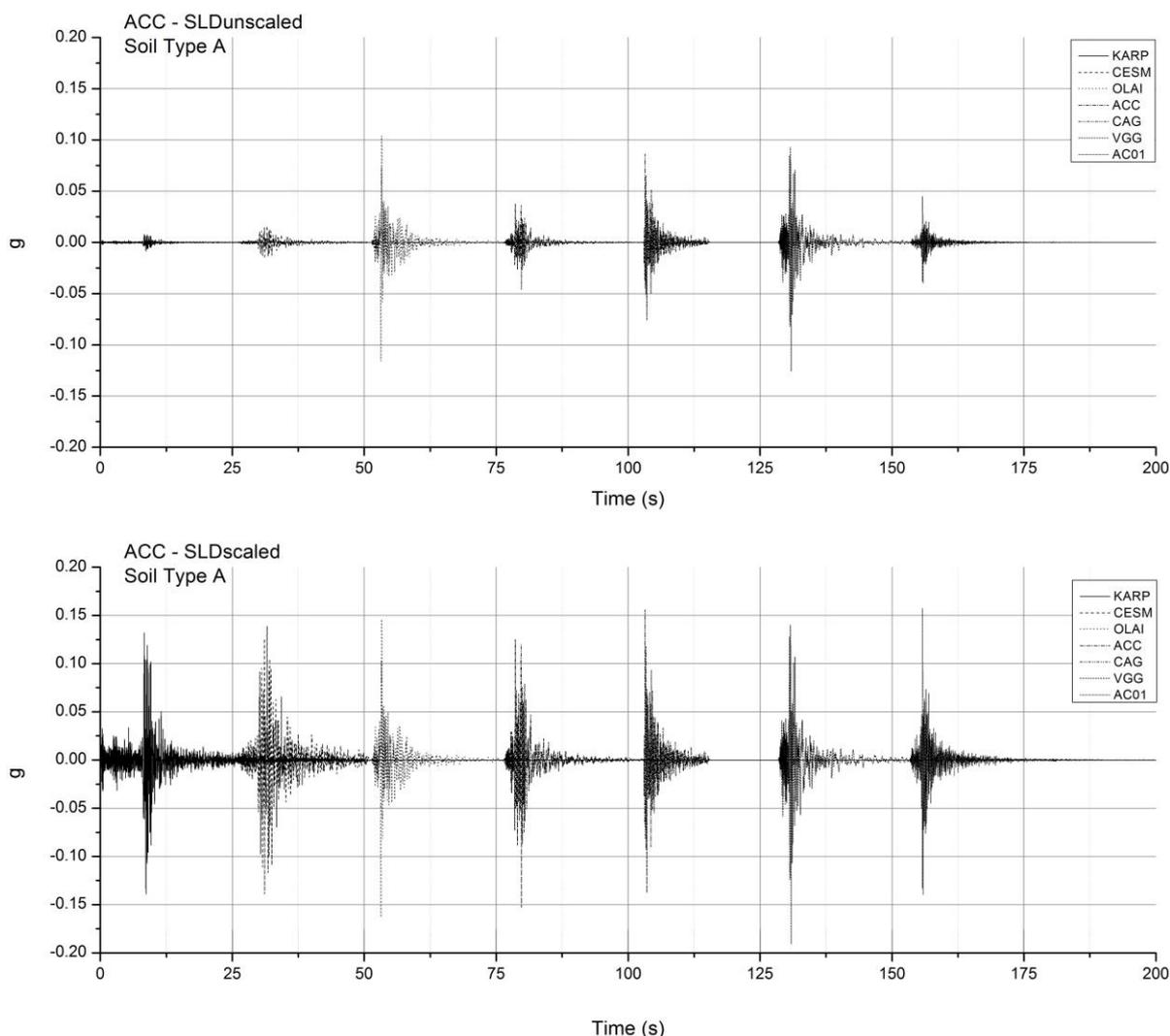


Figura 24 Insieme dei 7 accelerogrammi non scalati (sopra) e scalati (sotto) in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLD su suoli di classe A.

Sono stati privilegiati i terremoti avvenuti in area Appenninica Italiana ed in particolare è stato possibile selezionarne 3 (Centro-Italia, 3 aprile 1998; Centro-Italia, 26 agosto 2016; Sud-Italia 25,

ottobre 2012) dei quali il primo ed il terzo registrati in due stazioni distinte. A questi sono stati aggiunti due terremoti verificatisi in Grecia (Grecia continentale, 6 febbraio 2014; Isole del Dodecaneso, 13 giugno 2014). Per l'evento #7 (stazione KARP) il fattore di scalatura (Figura 24) è importante e superiore a 10 mentre per tutti gli altri eventi il fattore di scalatura varia da un minimo di 1.31 ad un massimo 3.91.

La magnitudo M degli eventi selezionate varia da 4.7 a 5.2 mentre la distanza epicentrale D varia da 9.4 a 23.2 km.

7.4.2 Selezione AN per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita - SLV

Per l'analisi di SLV sono stati analizzati 12 eventi sismici verificatisi in area europea e per ciascuno è stata analizzata la risposta dei due sensori orizzontali per un totale di 24 accelerogrammi.

Anche nel caso della SLV gli AN sono stati pre-scalati utilizzando come fattore di aggancio la PGA e successivamente, attraverso l'analisi del parametro D_{rms} , disponibile in In-Spector, secondo i criteri definiti al par.5.4, gli AN sono stati ridotti a 7 (Figura 25 e Figura 26).

Sono stati privilegiati i terremoti avvenuti in area Appenninica Italiana ed in questo caso è stato possibile selezionarne 2 (Centro-Italia, 26 ottobre 2016; Sud-Italia, 9 settembre 1998) dei quali il secondo registrato in due stazioni distinte. A questi sono stati aggiunti due terremoti verificatisi in Grecia (Grecia Continentale, 5 novembre 1997 e 7 settembre 1999), un terremoto verificatosi in Slovenia (Bovec, 12 aprile 1998) e infine un terremoto in area turca (16 dicembre 1990).

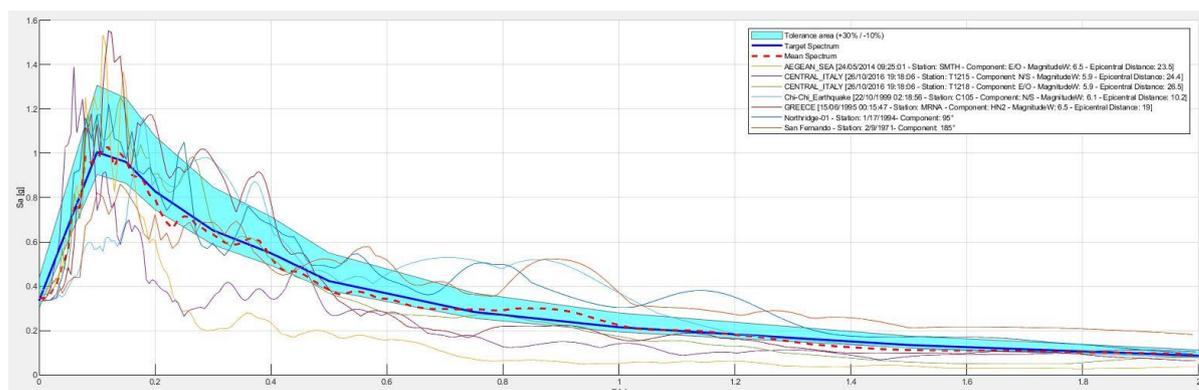


Figura 25 Insieme dei 7 accelerogrammi scalati in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLV. In linea blu è visibile lo spettro-target e l'area di convergenza +30% / -10% è indicata con la campitura azzurra.

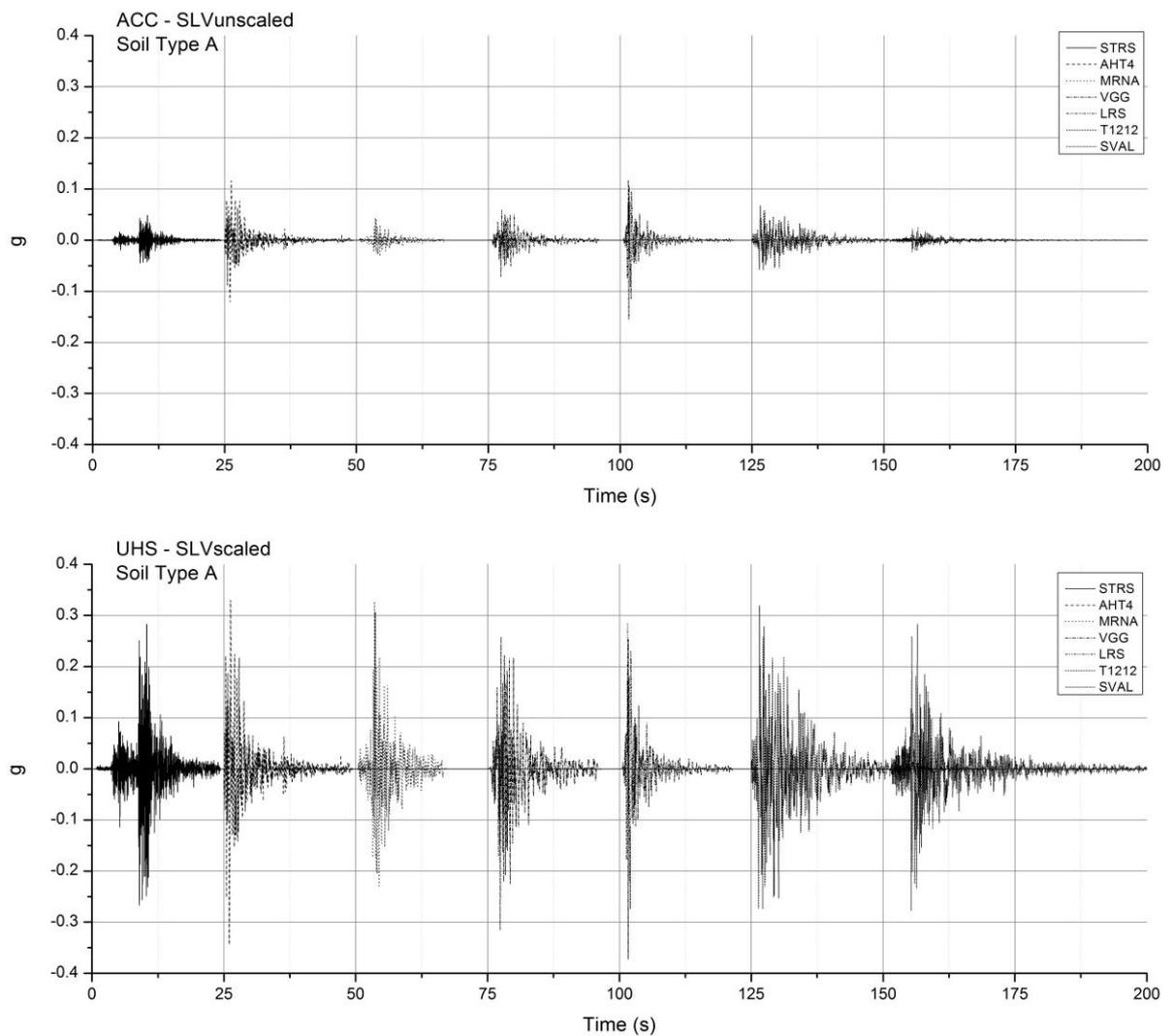


Figura 26 Insieme dei 7 accelerogrammi non scalati (sopra) e scalati (sotto) in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLV su suoli di classe A.

Lo spettro medio ricade molto bene nell'area di convergenza (Figura 25) fatta eccezione per il tratto sino a 0.05 s nel quale si colloca al limite inferiore di detta zona. Sulla scelta di non eccedere nella scalatura per "forzare" lo spettro medio nell'area di convergenza valgono le considerazioni fatte per il caso SLD.

Fattori di scala significativi e comunque inferiori a 10 sono stati utilizzati per gli eventi #1 e #7 mentre per tutti gli altri eventi i fattori di scala variano da 1.82 a 4.39.

La magnitudo M degli eventi selezionate varia da 5.5 a 5.9 mentre la distanza epicentrale D varia da 5.5 a 23.5 km.

7.4.3 Selezione AN per lo Stato Limite di Collasso - SLC

Per l'analisi di SLC sono stati analizzati 18 eventi sismici verificatisi in area europea ed extra-europea e per ciascuno è stata analizzata la risposta dei due sensori orizzontali per un totale di 36 accelerogrammi.

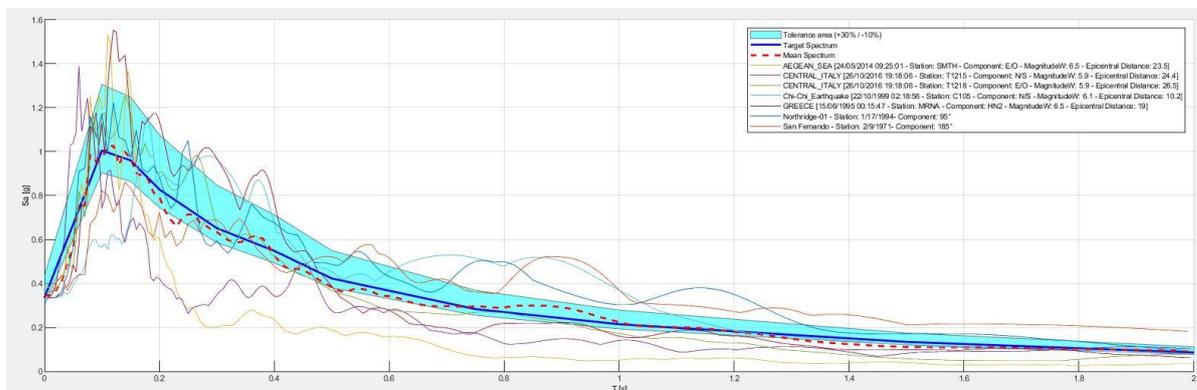


Figura 27 *Insieme dei 7 accelerogrammi scalati in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLC. In linea blu è visibile lo spettro-target e l'area di convergenza +30% / -10% è indicata con la campitura azzurra.*

Anche nel caso della SLC gli AN sono stati pre-scalati utilizzando come fattore di aggancio la PGA e successivamente, attraverso l'analisi del parametro $Drms$, disponibile in In-Spector, secondo i criteri definiti al par.5.4, gli AN sono stati ridotti a 7 (Figura 27 e Figura 28).

In questo caso è stato possibile utilizzare un solo terremoto avvenuto in area Appenninica Italiana (Centro-Italia, 26 ottobre 2016) del quale si è fatto uso di sue registrazioni acquisite su stazioni distinte. Sono stati poi utilizzati due terremoti verificatisi in Grecia (Grecia Continentale, 15 giugno 1995; Grecia Insulare, 24 maggio 2014), un terremoto verificatosi in Cina (Chi_Chi, 22 ottobre 1999) e due terremoti verificatisi negli Stati Uniti Occidentali (Northridge, 17 gennaio 1994; San Fernando, 9 febbraio 1971).

Lo spettro medio ricade molto bene nell'area di convergenza (Figura 27) fatta eccezione per il tratto sino a 0.05 s nel quale si colloca al limite inferiore di detta zona. Sulla scelta di non eccedere nella scalatura per "forzare" lo spettro medio nell'area di convergenza valgono le considerazioni fatte per il caso SLV e SLD.

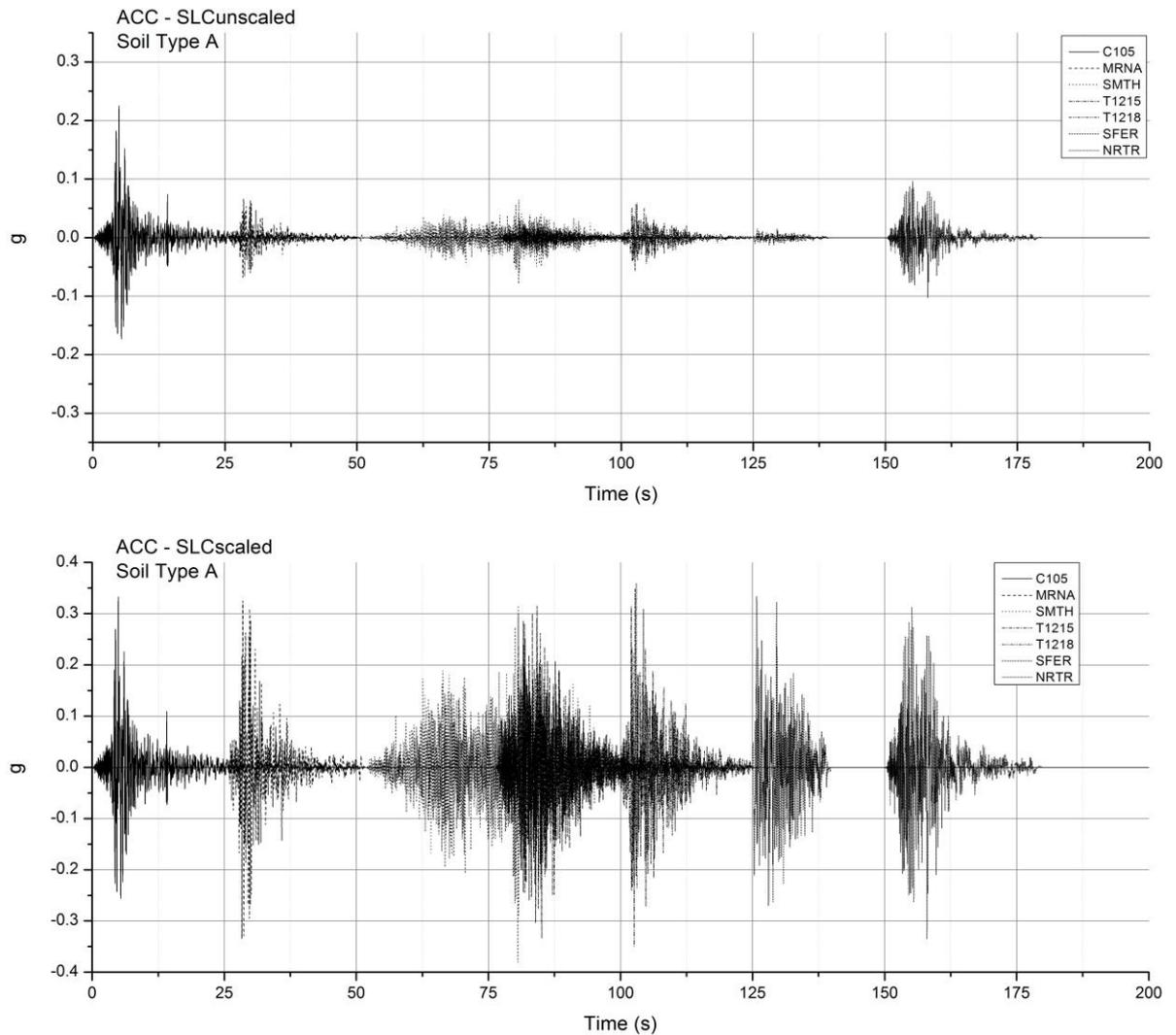


Figura 28 *Insieme dei 7 accelerogrammi non scalati (sopra) e scalati (sotto) in termini di spettro-compatibilità per la condizione SLC su suoli di classe A.*

Fattori di scala significativi e comunque inferiori a 10 sono stati utilizzati per gli eventi #2 e #7 mentre per tutti gli altri eventi i fattori di scala variano da 1.48 a 4.86.

La magnitudo M degli eventi selezionate varia da 5.9 a 6.5 mentre la distanza epicentrale D varia da 10.2 a 26.5 km.

8 Conclusioni

Il presente studio ha riguardato lo studio della pericolosità sismica e la definizione dell'input sismico per le simulazioni di RSL per la cassa di espansione del Fiume Secchia in vicinanza di Modena.

La pericolosità sismica è stata stimata con il metodo probabilistico in termini di PGA e di spettro di accelerazione per un P_R di 150 e T_R di 150, 1425 e 2475 anni corrispondenti alle tre condizioni di normativa SLD (Pe 63%), SLV (Pe 10%) ed SLC (Pe 5%). Tutte le simulazioni sono state fatte su suoli di classe A ($V_{s30} > 800$ m/s)

I valori di scuotimento risultanti dalla simulazione eccedono quelli desumibili dalla mappa nazionale di pericolosità sismica del 2004 e ad oggi valida come documento di riferimento. In particolare, per quanto riguarda la PGA si osserva un incremento rispettivamente del 15%, del 18% e del 42% per le tre condizioni SLC, SLV e SLD. Le differenze sono presumibilmente attribuibili all'aggiornamento della zonazione sismica con l'introduzione delle strutture sismogenetiche presenti nel DISS, alla maggiore incertezza attribuita nella definizione della magnitudo massima di ciascuna sorgente/zona ed all'utilizzo di relazioni di attenuazione più recenti e quindi diverse rispetto a quelle utilizzate per la MPS04.

L'analisi della accelerazione attesa per rielaborazione della sismicità storica e delle sorgenti sismogenetiche indica per il sito valori che possono anche essere significativi specie se si include nel calcolo l'aliquota positiva della deviazione standard. Il sisma del 1501, di M pari a 6.05 e distante 15.5 km, determina un valore di accelerazione superiore a 0.10g. Il terremoto del 1671, di M pari a 5.27 e distante 4.4 km, determina un valore di accelerazione superiore a 0.15g. Il sisma del 1923, di M pari a 5.04 e distante 7.1 km, determina un valore di accelerazione superiore di 0.082g. Per quanto riguarda invece le sorgenti sismogenetiche prossime, quella che determina il valore più alto della accelerazione è la ITIS107 (Mirandola), distante 27 km, con 0.041 g (senza l'inclusione della deviazione standard).

Per lo studio di RSL sono stati selezionati 3 gruppi di 7 accelerogrammi orizzontali spettro-compatibili per i tre T_R definiti in base al P_R di norma (SLD, SLV e SLC). Gli accelerogrammi, estratti dalle diverse banche dati disponibili, sono stati selezionati in base a criteri sismotettonici, ai parametri magnitudo-distanza, alle caratteristiche di durata ed intensità del treno d'onda sono stati analizzati in termini di fattore di forma spettrale ed opportunamente scalati per ottenere uno spettro-medio ricompreso nella zona di convergenza dello spettro-target.

Prof. Roberto Francese
Università degli Studi di Parma

9 Bibliografia

- Acunzo, G., Pagliaroli, A., and Scasserra, G., 2014, In-Spector: un software di supporto alla selezione di accelerogrammi naturali spettrocompatibili per analisi geotecniche e strutturali, 33 GNGTS, Bologna november 25-27 2014, 2, 107-114, ISBN: 978-88-940442-2-5.
- ANIDIS - Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica, 2008, Spettri-NTCver.1.0.3.xls.
- Bindi, D., Cotton, F., Kotha, S.R., Bosse, C., Stromeyer, D. and Grunthal, G., 2017, Application driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments in noncratonic moderate-seismicity areas, *Journal of Seismology*, 21, 5), 1201-1218.
- Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., and Paolucci, R., 2011, Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1899-1920.
- Burrato, P., Ciucci, F., Valensise, G., 2003, An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. *Ann. Geophys.*, 46, 5, 865-882.
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., and Bianchini, A., 2015, Updated predictive equations for broadband (0.01-10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 6, 1587-1612.
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- CSI Working Group, 2006, Catalogo della sismicità italiana - CSI 1.1 1981-2002, INGV, doi: 10.13127/CSI.1.1.
- DISS Working Group, 2018, Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.
- Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.
- ISIDe Working Group, 2007, Italian Seismological Instrumental and Parametric Database (ISIDe), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), doi: 10.13127/ISIDE.
- Kagan, Y. Y., 2010, Earthquake size distribution: Power-law with exponent? *Tectonophysics*, 490, 103-114.
- Locati, M., Camassi, R., Rovida, A., Ercolani, E., Bernardini, F., Castelli, V., Caracciolo, C.H., Tertulliani, A., Rossi, A., Azzaro, R., D'Amico, S., and Antonucci, A., 2021, Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), doi: 10.13127/DBMI/DBMI15.3.
- Martelli, L., Bonini, M., Calabrese, L., Corti, G., Ercolessi, G., Molinari, F.C., Piccardi, L., Pondrelli, S., Sani, F., Severi, P., 2017, Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Regione Emilia Romagna.
- Martelli, L., Ercolessi, G., Molinari, F.C., Calabrese, L., Severi, P., Bonini, M., Corti, G., Piccardi, L., Sani, F., Pondrelli, S., 2017, The new seismotectonic map of the Emilia-Romagna region and surrounding areas, 36mo Convegno Nazionale GNGDTS, Trieste 14-16 novembre 2017, *Riassunti estesi delle comunicazioni*, 47-53.
- Meletti C. e Valensise G. (a cura di), 2004, Zonazione sismogenetica ZS9, in: Gruppo di Lavoro, Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo

- 2003, Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma, App. 2, 38 pp.
- Meletti, C. D'Amico, V., Ameri, G., Rovida, A., and Stucchi, M., 2012, Seismic hazard in the Po Plain and the 2012 Emilia earthquakes, *Annals of Geophysics*, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6158.
- Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G., and Boschi, E., 2008, A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics*, 450, 85–108.
- Meletti, C., Patacca, E., and Scandone, P., 2000, Construction of a seismotectonic model: the case of Italy, *Pageoph*, 157, 11-35.
- MIT, 2014, Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse), D. Min. II. TT. 26 giugno 2014 – NT Dighe.
- MIT, MI, DPC, 2008, Norme tecniche per le costruzioni, D. Min. 14 gennaio 2008.
- MIT, MI, DPC, 2018, Norme tecniche per le costruzioni, D. Min. 17 gennaio 2018.
- Montone, P., Amato, A., e Pondrelli S., 1999, Active stress map of Italy, *J. Geophys. Res.*, 104, B11, 25595-25610.
- MPS Working Group, 2004, Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 Marzo 2003, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano-Roma, Italy, 65 pp.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V., 2015, Crisis2015 Ver. 1.0: Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingenieria, UNAM.
- Patacca, E., Sartori, R., and Scandone, P., 1990, Tyrrhenian basin and apenninic arcs: kinematic relations since Late Tortonian times, *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, 425-451.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Morelli, A., Ekström, G., Postpischl, L., Vannucci, G., and Boschi E., 2011, European-Mediterranean regional centroid moment tensor catalog: solutions for 2005-2008, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 185, 3-4, 74-81, doi: 10.1016/j.pepi.2011.01.007.
- Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse Sezione di Firenze, Università di Firenze, Università di Bologna, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2004, Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, in scala 1:250,000.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A., 2021, Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), doi: 10.13127/CPTI/CPTI15.3.
- Scandone P. e Stucchi M., 2000, La zonazione sismogenetica ZS4 come strumento per la valutazione della pericolosità sismica, in: Galadini F., Meletti L e Rebez A. (a cura di), *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999)*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 3-14.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Akinci A., Faccioli E., Gasperini P., Malagnini L., Valensise G., 2004, Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), doi: 10.13127/sh/mps04/ag.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Akinci A., Faccioli E., Gasperini P., Malagnini L., Valensise G., 2004, Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04.
- Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Akinci, A., Faccioli, E., Gasperini, P., Malagnini, L., and Valensise, G. 2004, Valori di Mmax, di b, completezze. Dati di ingresso per la redazione di MPS04 [Data

set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).
<https://doi.org/10.13127/SH/MPS04/INPUTDATA>.

Vannoli, P., Basili, R., and Valensise, G., 2004, New geomorphologic evidence for anticlinal growth driven by blind-thrust faulting along the northern Marche coastal belt (central Italy), *J. Seismol.*, 8, 297–312.

Vannoli, P., Burrato, P., and Valensise, G., 2015, The seismotectonics of the Po Plain (northern Italy): tectonic diversity in a blind faulting domain, *Pure Appl. Geophys.*, 172, 1105–1142, doi:10.1007/s00024-014-0873-0.

Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.