

**IMPIANTO DI RIGOSO – DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE:
SERVIZI DI PROGETTAZIONE**



**RECUPERO DELLA DIGA DI LAGO VERDE
PROGETTO DEFINITIVO**



TITOLO

**STUDIO SISMOTETTONICO E
ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA**

CODICE OPERA

C732

CODICE ELABORATO

R006

REVISIONE	DATA	NOTE
4	05/06/2023	Quarta revisione in seguito all'Istruttoria della DGD del 30/09/2023

Contratto: n° 1401366462

Oggetto: **IMPIANTO DI RIGOSO - DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE:
SERVIZI DI PROGETTAZIONE**

Data contratto: 05 Giugno 2020

Durata: 36 mesi

Cliente: **Enel Green Power S.p.A.**

Gestore del Contratto Ing. Federica Cella

Gestione Tecnica Ing. Luca Dal Canto

ATI: STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. (Mandataria)
Frosio Next S.r.l. (Mandante)
Waterways S.r.l. (Consulente)

ATI PM: Gianluca Gatto

ATI Staff Federico Bisci, Gioele Filippi, Piero Civollani, Fabrizio Cassone,
Simone Di Lorenzo, Alessandro Ferrera, (Speri)
Matteo Rebuschi, Luigi Papetti, Caterina Frosio (Frosio Next)
Luciano Serra, Federico Marini, Anxhela Zaza (Waterways)

Storia del documento

Revisione	Data	Redatto	Verificato	Approvato	Note
0	01/12/2020	CIV, PAS	GGA	GLU	Prima emissione
1	04/12/2020	CIV, PAS	GGA	GLU	Revisione a seguito dei commenti di ENEL
2	10/12/2020	CIV, PAS	GGA	GLU	Revisione a seguito dei commenti di ENEL
3	26/04/2022	Piero Civollani Francesco Passaro Federico Bisci Gioele Filippi	Gianluca Gatto	Giorgio Lupoi	Revisione a seguito dei commenti di ENEL
4	05/05/2023	Piero Civollani Francesco Passaro Federico Bisci Gioele Filippi	Gianluca Gatto	Giorgio Lupoi	Revisione in seguito all'Istruttoria della DGD del 30/09/2023.

STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. e Frosio Next S.r.l. non si assumono alcuna responsabilità per l'utilizzo da parte di terzi di risultati o metodi presentati in questo rapporto.

Le Società sottolineano inoltre che varie sezioni di questo rapporto si basano su dati forniti da o provenienti da fonti di terze parti. **STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. e Frosio Next S.r.l.** non si assumono alcuna responsabilità per perdite o danni subiti dal cliente o da terzi a causa di errori o inesattezze in tali dati da terze parti

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. PERICOLOSITÀ SISMICA DI NORMATIVA	7
3. STORIA DELLA SISMICITÀ DEL SITO E DELLA DIGA	13
4. CARATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA DELL'AREA.....	17
4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE.....	17
4.2 QUADRO SISMOTETTONICO DELLE REGIONI DELLA GARFAGNANA E LUNIGIANA.....	19
4.3 SORGENTI SISMOGENETICHE	24
5. STUDIO SISMOTETTONICO E ANALISI PROBABILISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA	32
5.1 MODELLO SISMOTETTONICO	32
5.1.1 <i>Introduzione.....</i>	32
5.1.2 <i>Modello di zonazione</i>	33
5.1.3 <i>Catalogo CPT15.....</i>	34
5.1.4 <i>Tassi per classi di magnitudo</i>	36
5.1.5 <i>Distribuzione di Gutenberg-Richter.....</i>	39
5.2 ANALISI DI PERICOLOSITÀ SISMICA	42
5.2.1 <i>Leggi di attenuazione.....</i>	42
5.2.2 <i>Curve di pericolosità.....</i>	43
5.2.3 <i>Spettri a pericolosità uniforme.....</i>	46
5.2.4 <i>Confronto con gli spettri di norma</i>	51
6. ANALISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA.....	55
6.1 INTRODUZIONE	55
6.2 DATABASE DI SORGENTI SISMOGENETICHE INDIVIDUALI DISS.....	55
6.3 LEGGI DI ATTENUAZIONE.....	55
6.4 RISULTATI DELL'ANALISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITÀ SISMICA.....	55
7. CONFRONTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI DI PERICOLOSITÀ	57
7.1 DATI DEL CONFRONTO	57
7.2 CONFRONTO PER STATO LIMITE DI DANNO	58
7.3 CONFRONTO PER STATO LIMITE DI COLLASSO.....	60
8. CONCLUSIONI	62
BIBLIOGRAFIA	63

APPENDICE A STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STORICA	67
APPENDICE B STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STATISTICA.....	71

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto riporta i risultati dello **studio sismotettonico** e dell'**analisi di pericolosità sismica** per il progetto definitivo **di miglioramento sismico** e di recupero della diga di Lago Verde (PR).

La presente relazione è stata redatta in variante rispetto alle precedenti revisioni, per assolvere alle prescrizioni della DGD (istruttoria del 30/09/2022). Per semplicità di trattazione, le parti modificate rispetto alla prima emissione sono riportate evidenziate in ciano.

L'impianto di ritenuta è situato in corrispondenza della testata del Rio Lago Verde, nel Comune di Monchio delle Corti (PR). Il serbatoio ha lo scopo di regolare le portate del Torrente Rio Lago Verde per la produzione di energia elettrica della centrale di Rigoso.

L'intervento di dismissione ha l'obiettivo di privare permanentemente lo sbarramento della funzione di ritenuta idraulica, garantendo la sicurezza del sito e dei territori di valle (paragrafo H.2.5. delle "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", N.T.D. 2014).

Il progetto in esame è finalizzato al recupero della diga di Lago Verde, sostanzialmente fuori esercizio dal 18/3/1964, a seguito di lettera Enel indirizzata al Genio Civile di Parma, nella quale si comunicava che, non essendo conveniente sotto alcun punto di vista un intervento rilevante di ripristino della diga di Lago Verde, la stessa non sarebbe più stata messa in carico. L'intervento in progetto prevede l'abbassamento della diga fino alla quota 1505 di coronamento e di quota 1498 dello sfioratore, e quindi della massima regolazione. A seguito dell'intervento di demolizione e di recupero lo sbarramento, con la conseguente riduzione di altezza dei paramenti e di volume invasato, si avrà il declassamento della diga di Lago Verde a "diga di competenza regionale" (MinLLPP95) e a "diga di dimensioni contenute". Quanto previsto non modifica il comportamento strutturale dell'opera, che rimane quello di una diga a gravità. Pertanto, gli interventi in progetto non ricadono nell'obbligo normativo di eseguire l'adeguamento sismico (NTD14, Par. H.2.1).

Le coordinate geografiche della linea mediana del coronamento della Diga di Lago Verde in corrispondenza del punto centrale sono:

- LATITUDINE, **44.36397°**
- LONGITUDINE, **10.09087°**

L'opera di sbarramento in oggetto è ubicata in **zona sismica 2**.

Di seguito si riporta la vista aerea dell'opera di sbarramento unitamente ad alcune fotografie del corpo diga.



Figura 1.1 Vista aerea dell'opera di sbarramento



Figura 1.2. Foto del corpo diga: lato monte



Figura 1.3. Foto del corpo diga: lato valle

Il presente studio è stato redatto in accordo alle normative vigenti con particolare riferimento alle indicazioni delle "Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe" redatto congiuntamente dall'INGV e MIT-DG DIGHE nel 2017.

Sono stati assunti per lo studio i seguenti dati di input.

- Vita nominale (V_n): 50 anni (progetto di miglioramento);
- Coefficiente d'uso della costruzione (C_u): 2,0 (diga di importanza strategica in virtù dell'uso prevalentemente idroelettrico);
- Periodo di riferimento (V_R) = 100 anni;
- Periodo di ritorno allo SLD (T_R SLD) = 100 anni;
- Periodo di ritorno allo SLC (T_R SLC) = 1'946 anni.

La relazione, nei primi capitoli, descrive la pericolosità sismica prevista dalla normativa tecnica (capitolo 2) e presenta la storia della sismicità dell'area (capitolo 3) con particolare riferimento al comportamento dello sbarramento in occasione dei passati terremoti.

Nel capitolo 4 si presentano i risultati dello studio di inquadramento sismotettonico partendo da un'analisi della macroarea in cui è inserito lo sbarramento sino all'individuazione delle sorgenti sismogenetiche più prossime all'impianto.

Nel capitolo 5 si presentano il modello sismotettonico adottato e i risultati delle analisi di pericolosità sismica effettuate con approccio probabilistico.

Nel capitolo 6 si presentano i risultati dell'analisi deterministica di pericolosità sismica effettuata sulla sorgente sismogenetica più significativa risultante dall'inquadramento sismotettonico.

Nel capitolo 7 si riporta un confronto dei risultati delle analisi di pericolosità svolte con approccio probabilistico e presenta la scelta degli spettri di riferimento adottati per i differenti Stati Limite e deterministico. Con la scelta

2. PERICOLOSITÀ SISMICA DI NORMATIVA

La nuova classificazione sismica della Regione Emilia-Romagna, adottata con DGR 1164 del 23/07/2018, in accordo con la classificazione nazionale, inserisce il comune di Monchio delle Corti, in cui ricade la diga in esame, nella **zona sismica 2**.

Dalle Mappe Interattive di Pericolosità Sismica dell'INGV l'accelerazione orizzontale massima al sito per un periodo di ritorno pari a 475 anni è variabile tra **0,200 g e 0,225 g**, come riportato in Figura 2.1.

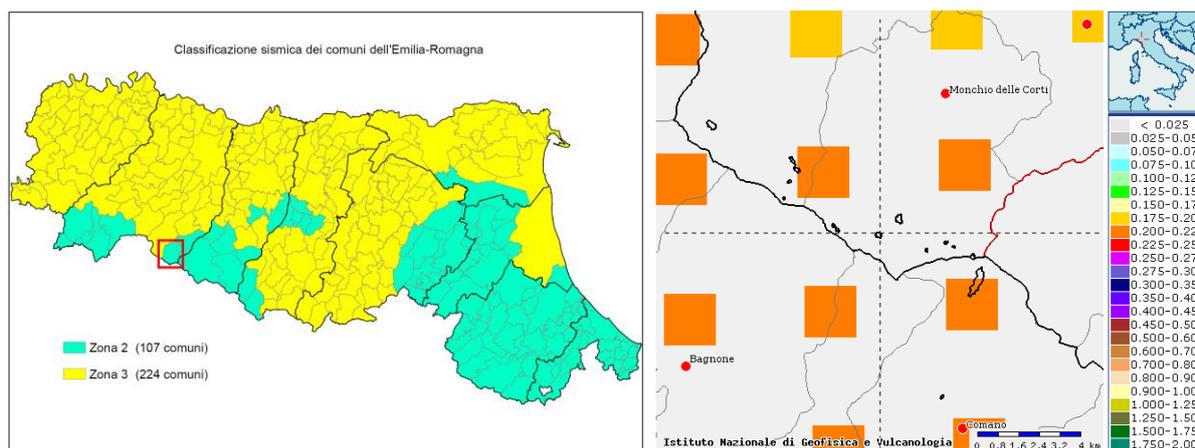


Figura 2.1. Zonazione sismica dell'Emilia-Romagna secondo la DGR 1164 del 23/07/2018; nel riquadro rosso è riportata l'ubicazione del Comune di Monchio delle Corti (a sinistra). Mappa Interattiva di Pericolosità Sismica dell'INGV con valori di accelerazione prevista per un tempo di ritorno di 475 anni su scala locale (a destra); il puntatore indica la posizione della diga di Lago Verde

In Figura 2.2 sono riportate le accelerazioni orizzontali di base in funzione delle frequenze annuali di superamento.

In Figura 2.3 è riportata la disaggregazione dell'accelerazione orizzontale di base in funzione della distanza e della magnitudo di un sisma con probabilità d'eccedenza del 10% in 50 anni.

In Figura 2.4 sono riportati gli spettri di risposta a pericolosità uniforme dell'accelerazione orizzontale per diversi valori di probabilità di eccedenza in 50 anni.

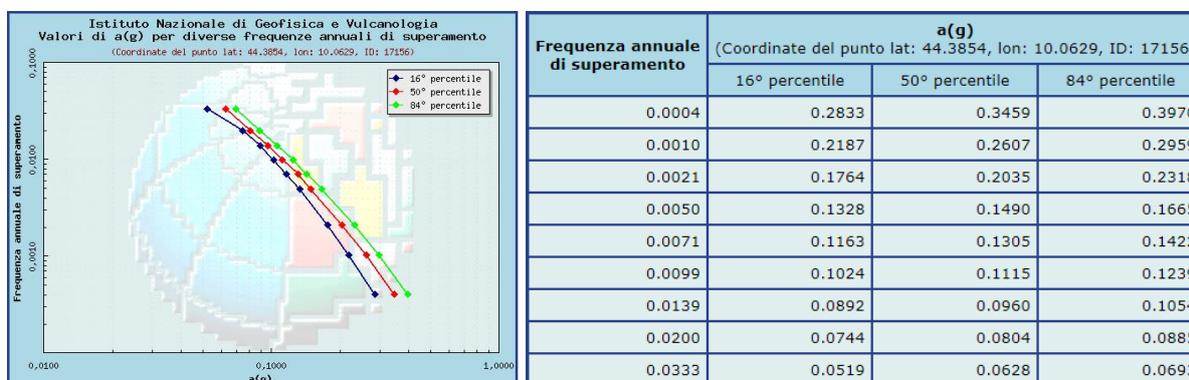


Figura 2.2. Grafico e tabella dell'accelerazione orizzontale di base in funzione della frequenza annuale di superamento per la diga di Lago Verde

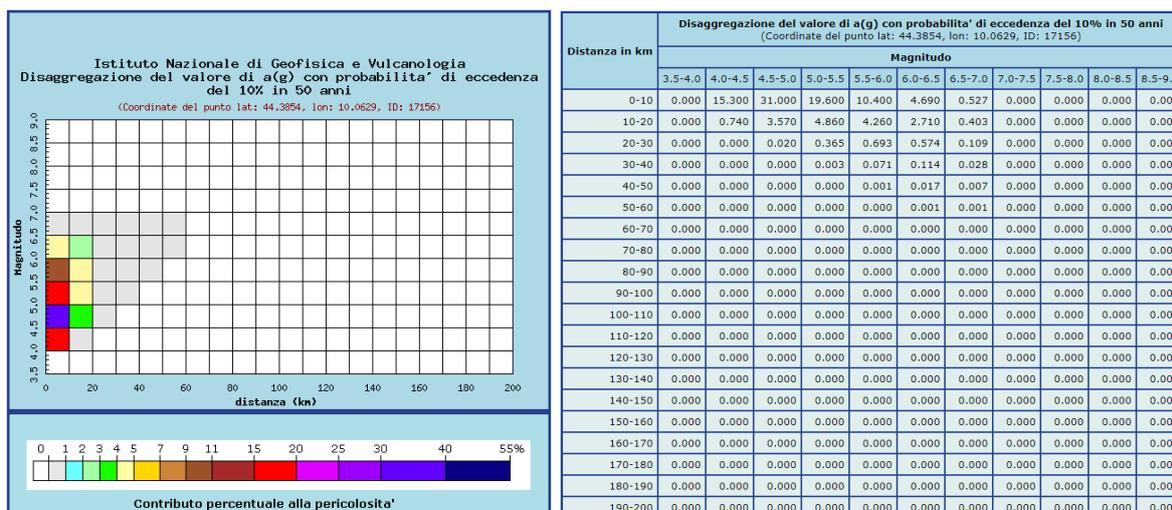


Figura 2.3. Grafico e tabella della disaggregazione dell'accelerazione orizzontale di base in funzione della distanza e della magnitudo di un sisma con probabilità di superamento del 10% in 50 anni per la diga di Lago Verde

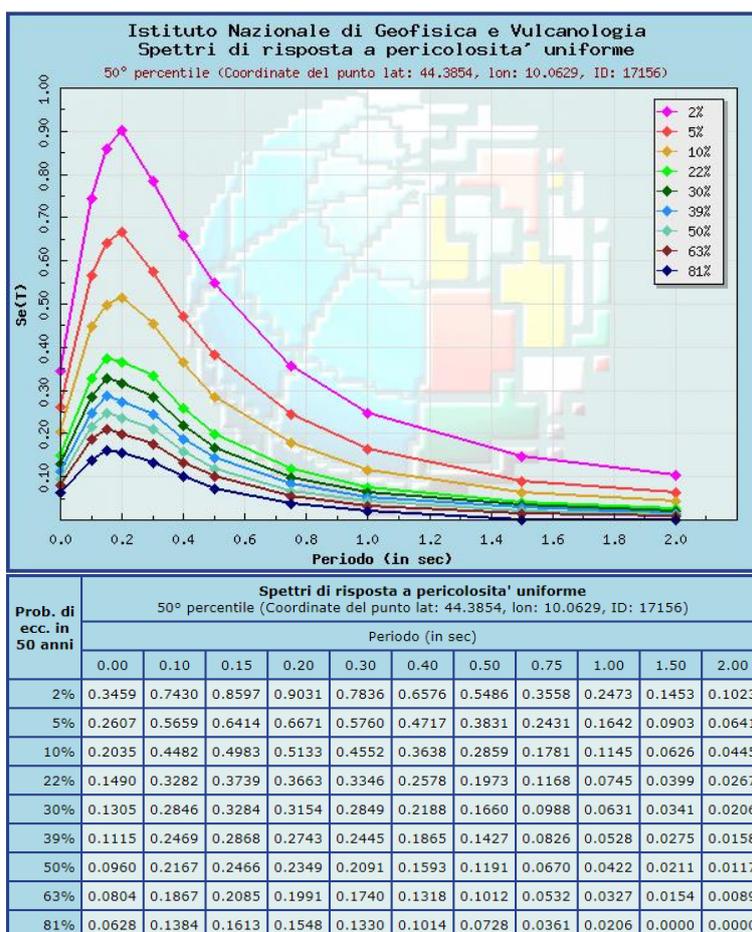


Figura 2.4. Grafico e tabella degli spettri di risposta a pericolosità uniforme dell'accelerazione orizzontale per diversi valori di probabilità di eccedenza in 50 anni per la diga di Lago Verde

Nel caso in esame, come riportato in introduzione, si considera una vita nominale pari a 50 anni e un coefficiente d'uso pari a 2,0 (dia di importanza strategica) e gli stati limite di interesse sono lo stato limite di danno, SLD, cui corrisponde un periodo di ritorno di 100 anni e lo stato limite di collasso, SLC, cui corrisponde un periodo di ritorno di 1946 anni.

A scopo di completezza vengono presentati i risultati relativi a periodi di ritorno di 50 anni, 101 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni e 2475 anni.

Per la definizione della pericolosità sismica per il sito specifico si è operato per interpolazione sui dati disponibili, prendendo in considerazione la componente orizzontale del moto sismico per i periodi di ritorno richiesti.

Tabella 2.1. Valori delle accelerazioni spettrali con componente orizzontale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

Tr [anni]	50	101	201	475	975	1950	2475
Pr [%]	64%	39%	22%	10%	5%	3%	2%
PGA [g]	0,081	0,111	0,149	0,203	0,261	0,322	0,346

I risultati (periodo di ritorno pari a 101 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni, 1950 anni, 2475 anni), riportati nella figura e nella tabella seguente, sono:

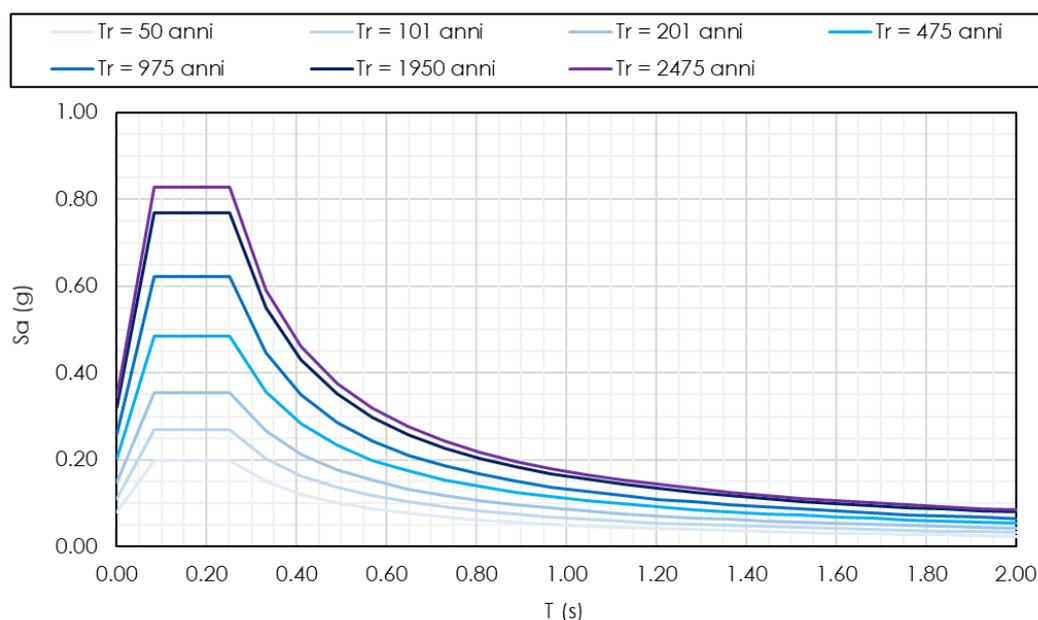


Figura 2.5. Pericolosità sismica secondo la normativa vigente NTC 2018 con componente orizzontale del moto sismico per periodi di ritorno pari a 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

Tabella 2.2. Valori delle accelerazioni spettrali con componente orizzontale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di interesse

	Tr = 50 anni	Tr = 101 anni	Tr = 201 anni	Tr = 475 anni	Tr = 975 anni	Tr = 1950 anni	Tr = 2475 anni
T	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa
(s)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
0.000	0.081	0.111	0.149	0.203	0.260	0.321	0.345
0.084	0.198	0.268	0.355	0.485	0.623	0.770	0.828
0.252	0.198	0.268	0.355	0.485	0.623	0.770	0.828
0.331	0.150	0.203	0.266	0.357	0.448	0.551	0.591
0.411	0.121	0.163	0.213	0.283	0.350	0.429	0.460
0.490	0.101	0.136	0.178	0.234	0.287	0.351	0.376
0.570	0.087	0.117	0.152	0.199	0.243	0.298	0.318
0.649	0.077	0.103	0.133	0.174	0.211	0.258	0.276
0.729	0.068	0.091	0.118	0.154	0.186	0.228	0.244
0.809	0.062	0.082	0.107	0.138	0.167	0.204	0.218
0.888	0.056	0.075	0.097	0.125	0.151	0.184	0.197
0.968	0.051	0.069	0.089	0.115	0.138	0.168	0.180
1.047	0.048	0.063	0.082	0.106	0.127	0.155	0.166
1.127	0.044	0.059	0.076	0.098	0.118	0.144	0.153
1.206	0.041	0.055	0.071	0.092	0.110	0.134	0.143
1.286	0.039	0.052	0.067	0.086	0.103	0.125	0.134
1.366	0.036	0.049	0.063	0.081	0.096	0.117	0.125
1.445	0.034	0.046	0.059	0.076	0.091	0.111	0.118
1.525	0.033	0.044	0.056	0.072	0.086	0.105	0.112
1.604	0.031	0.041	0.053	0.068	0.082	0.099	0.106
1.684	0.030	0.039	0.051	0.065	0.078	0.095	0.101
1.763	0.028	0.038	0.048	0.062	0.074	0.090	0.096
1.843	0.027	0.036	0.046	0.059	0.071	0.086	0.092
1.923	0.026	0.035	0.044	0.057	0.068	0.083	0.088
2.022	0.023	0.032	0.041	0.053	0.064	0.080	0.085
2.120	0.021	0.029	0.038	0.050	0.062	0.077	0.083
2.219	0.019	0.027	0.036	0.048	0.059	0.074	0.080
2.318	0.018	0.025	0.033	0.045	0.056	0.072	0.078
2.417	0.016	0.023	0.031	0.043	0.054	0.069	0.075
2.516	0.015	0.021	0.029	0.041	0.052	0.067	0.073
2.615	0.014	0.020	0.027	0.041	0.052	0.065	0.071
2.714	0.013	0.019	0.026	0.041	0.052	0.064	0.069
2.813	0.012	0.017	0.024	0.041	0.052	0.064	0.069
2.912	0.011	0.016	0.023	0.041	0.052	0.064	0.069
3.011	0.011	0.015	0.022	0.041	0.052	0.064	0.069
3.110	0.010	0.014	0.021	0.041	0.052	0.064	0.069
3.209	0.009	0.014	0.020	0.041	0.052	0.064	0.069
3.308	0.009	0.013	0.019	0.041	0.052	0.064	0.069
3.406	0.008	0.012	0.018	0.041	0.052	0.064	0.069
3.505	0.008	0.012	0.017	0.041	0.052	0.064	0.069
3.604	0.007	0.011	0.016	0.041	0.052	0.064	0.069
3.703	0.007	0.010	0.015	0.041	0.052	0.064	0.069
3.802	0.007	0.010	0.015	0.041	0.052	0.064	0.069
3.901	0.006	0.009	0.014	0.041	0.052	0.064	0.069
4.000	0.006	0.009	0.013	0.041	0.052	0.064	0.069

Infine, si riportano i valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico, calcolata in modo analogo alla componente orizzontale.

Tabella 2.3. Valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

Tr [anni]	50	101	201	475	975	1950	2475
Pr [%]	64%	39%	22%	10%	5%	3%	2%
PGA [g]	0,031	0,050	0,078	0,124	0,180	0,246	0,274

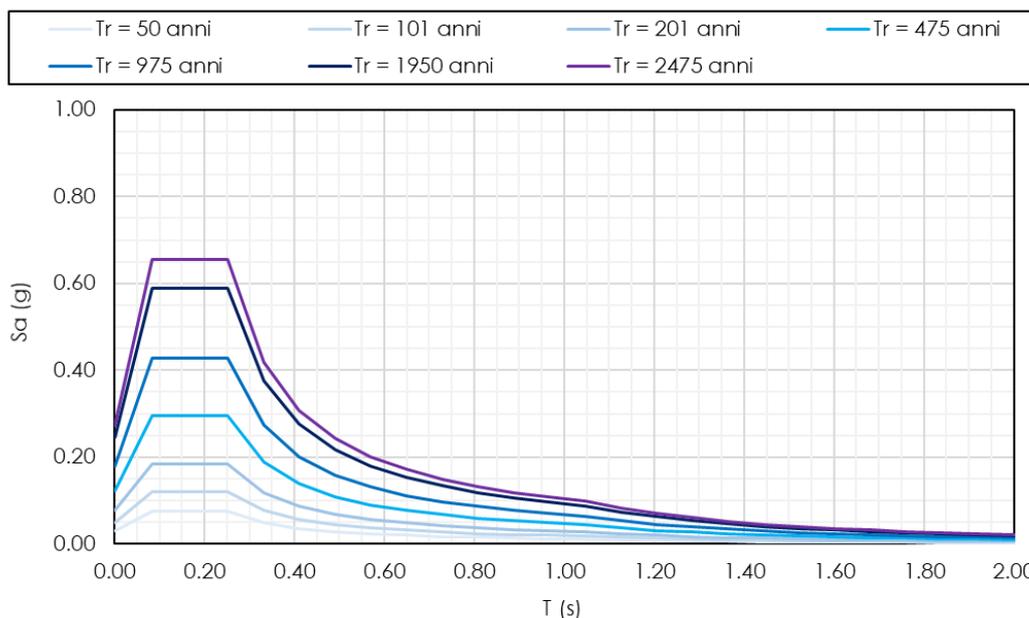


Figura 2.6. Pericolosità sismica secondo la normativa vigente NTC 2018 con componente verticale del moto sismico per periodi di ritorno pari a 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

Tabella 2.4. Valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di interesse

T	Tr = 50 anni	Tr = 101 anni	Tr = 201 anni	Tr = 475 anni	Tr = 975 anni	Tr = 1950 anni	Tr = 2475 anni
(s)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)
0.000	0.031	0.050	0.077	0.123	0.179	0.245	0.273
0.084	0.076	0.121	0.185	0.295	0.429	0.588	0.656
0.252	0.076	0.121	0.185	0.295	0.429	0.588	0.656
0.331	0.048	0.077	0.118	0.188	0.274	0.376	0.419
0.411	0.036	0.057	0.087	0.138	0.201	0.276	0.308
0.490	0.028	0.045	0.069	0.109	0.159	0.218	0.243
0.570	0.023	0.037	0.057	0.090	0.131	0.180	0.201
0.649	0.020	0.031	0.048	0.077	0.112	0.153	0.171
0.729	0.017	0.027	0.042	0.067	0.097	0.134	0.149
0.809	0.015	0.024	0.037	0.059	0.086	0.118	0.132
0.888	0.014	0.022	0.033	0.053	0.077	0.106	0.119
0.968	0.012	0.020	0.030	0.048	0.070	0.096	0.108
1.047	0.011	0.018	0.028	0.044	0.064	0.088	0.098
1.127	0.010	0.015	0.023	0.037	0.054	0.074	0.082
1.206	0.008	0.013	0.020	0.031	0.046	0.063	0.070
1.286	0.007	0.011	0.017	0.027	0.039	0.054	0.060
1.366	0.006	0.010	0.015	0.023	0.034	0.047	0.052
1.445	0.005	0.008	0.013	0.020	0.030	0.041	0.046
1.525	0.005	0.007	0.011	0.018	0.026	0.036	0.040
1.604	0.004	0.007	0.010	0.016	0.023	0.032	0.036
1.684	0.004	0.006	0.009	0.014	0.021	0.029	0.032
1.763	0.003	0.005	0.008	0.013	0.019	0.026	0.029
1.843	0.003	0.005	0.007	0.012	0.017	0.024	0.026
1.923	0.003	0.004	0.007	0.011	0.016	0.021	0.024
2.022	0.003	0.004	0.006	0.010	0.014	0.020	0.022
2.120	0.002	0.004	0.006	0.009	0.013	0.018	0.020
2.219	0.002	0.003	0.005	0.008	0.012	0.017	0.018
2.318	0.002	0.003	0.005	0.008	0.011	0.015	0.017
2.417	0.002	0.003	0.004	0.007	0.010	0.014	0.016
2.516	0.002	0.003	0.004	0.007	0.010	0.013	0.015
2.615	0.002	0.003	0.004	0.006	0.009	0.012	0.014
2.714	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.011	0.013
2.813	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008	0.011	0.012
2.912	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	0.011
3.011	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010
3.110	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.009	0.010
3.209	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.009
3.308	0.001	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009
3.406	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008
3.505	0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008
3.604	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.007
3.703	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007
3.802	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007
3.901	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.006
4.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.006

3. STORIA DELLA SISMICITÀ DEL SITO E DELLA DIGA

In questo capitolo è presentata una analisi storica degli eventi sismici occorsi nell'area del sito basata sui dati contenuti nell'ultimo Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15, Rovida et al 2016).

In Figura 3.1 e Figura 3.2 sono rappresentati tutti gli eventi del Catalogo con Magnitudo Momento (M_w) pari o superiore a 4 e con epicentro entro 100 km dal sito.

Dalle figure emerge che il sito è interessato da una **sismicità elevata e diffusa** con eventi di magnitudo elevata (maggiore di 5) a distanze ravvicinate (inferiori a 25 km).

Per ogni evento sismico è stata, quindi, stimata l'accelerazione al sito per mezzo della legge di attenuazione di Sabetta & Pugliese (1996).

Nella Tabella 3.1 e nella Figura 3.3 sono riportati i soli eventi cosiddetti significativi cioè quelli che hanno generato un'accelerazione orizzontale di base (stimata) maggiore di 0,05 g.

Dall'analisi degli eventi significativi emerge che:

- l'intervallo temporale tra due eventi significativi si riduce con il progredire degli anni per via della maggior completezza del catalogo, sino ad arrivare ad intervalli dell'ordine di una decina di anni;
- l'evento più significativo che ha interessato la diga è il terremoto della **Garfagnana del 1920 con magnitudo 6,53 e distanza pari a 24,9 km**, massima intensità macrosismica (I_0) 10 MCS ed **accelerazione stimata pari a 0,13 g**;
- questo evento presenta una accelerazione equivalente a quella della normativa NTC 2018 per un periodo di ritorno pari a 140 anni.

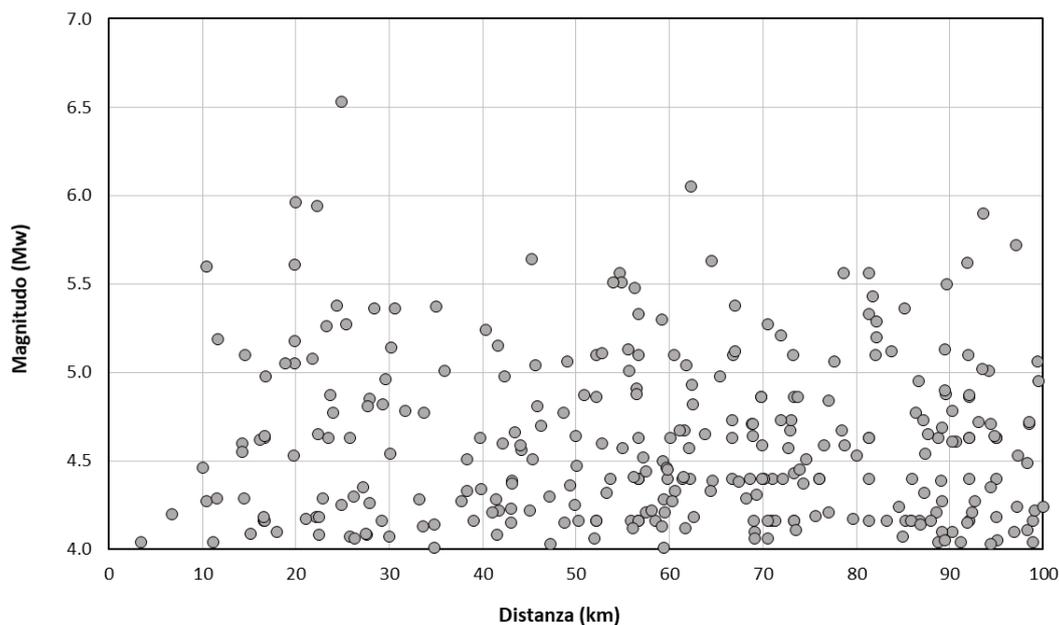


Figura 3.1. Distribuzione dei sismi con $M_w \geq 4$ in funzione della distanza epicentrale (minore di 100 km)

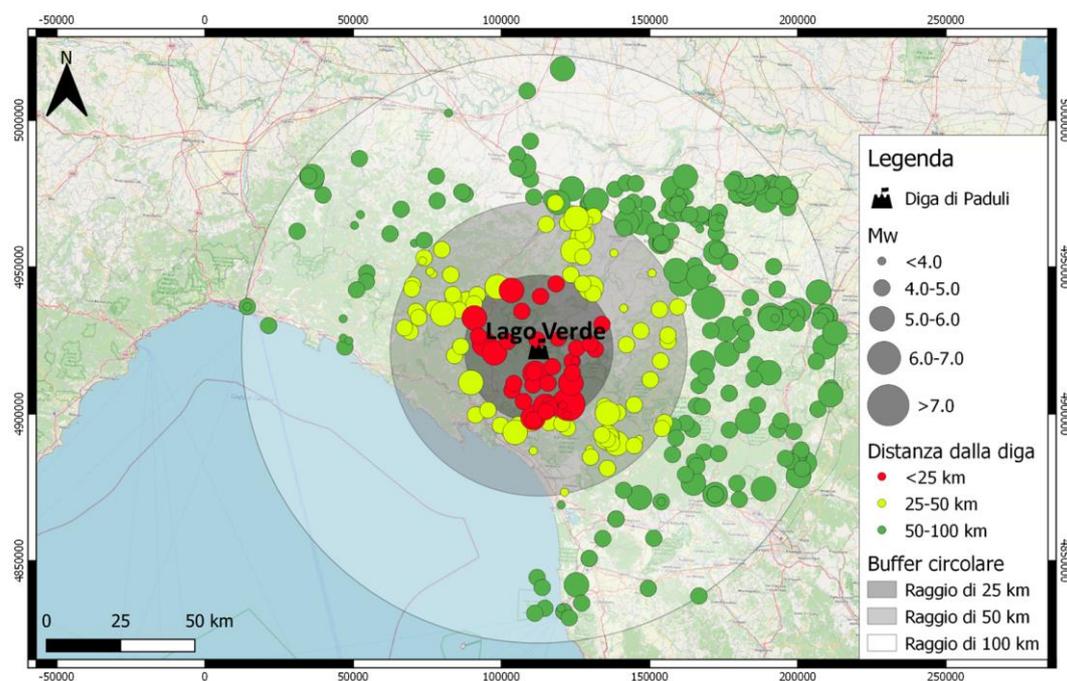


Figura 3.2. Mappa della distribuzione dei sismi tratti dal CPTI15 classificati in funzione della distanza dalla diga e della magnitudo

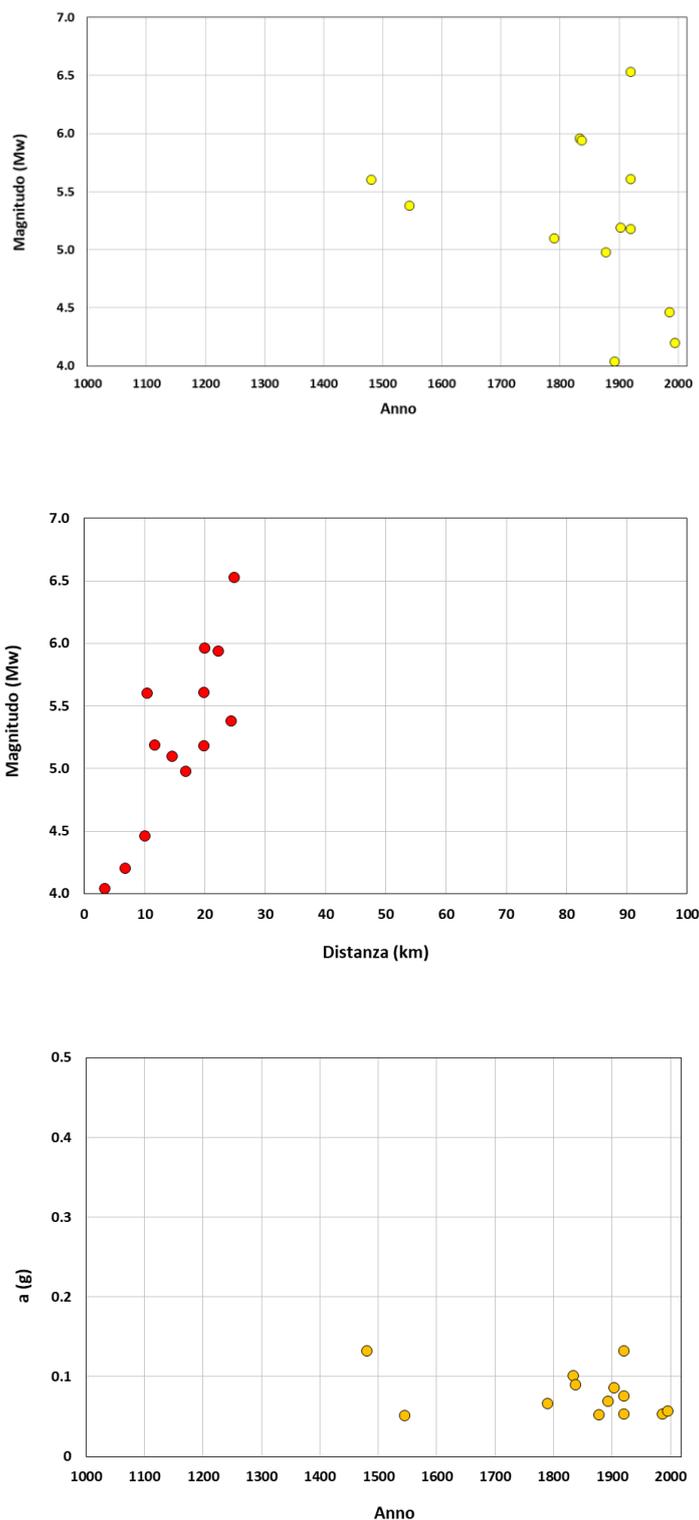


Figura 3.3. Eventi significativi che hanno interessato il sito con un valore di PGA almeno superiore a 0,05g Distribuzione della magnitudo in funzione dell'anno (in alto) e della distanza (al centro); intensità dell'azione sismica al sito in funzione dell'anno (in basso)

Tabella 3.1. Elenco dei terremoti che hanno prodotto un'accelerazione al sito d'interesse significativa

N	Year	EpicentralArea	MainRef	Lat	Lon	Depth (km)	Io (MCS)	Mw	ErMw	Distance (km)	a (g)
1	1481	Lunigiana	CFTI4med	44.274	10.130		8	5.60	0.41	10.48	0.1321
2	1545	Val di Taro	CFTI4med	44.473	9.825		7-8	5.38	0.42	24.36	0.0516
3	1790	Lunigiana	MOLAL008	44.354	9.909		7	5.10	0.46	14.51	0.0661
4	1834	Val di Taro-Lunigiana	CFTI4med	44.432	9.859		9	5.96	0.11	19.92	0.1014
5	1837	Lunigiana	CFTI4med	44.175	10.182		9	5.94	0.14	22.23	0.0898
6	1878	Lunigiana	ENEL988	44.218	10.037		6-7	4.98	0.40	16.79	0.0524
7	1893	Appennino parmense	CAMAL011b	44.376	10.130		4-5	4.04	0.20	3.38	0.0693
8	1903	Lunigiana	ENEL988	44.329	9.953		7-8	5.19	0.12	11.64	0.0864
9	1920	Garfagnana	POST985	44.250	10.283		6	5.61	0.14	19.86	0.0759
10	1920	Garfagnana	CFTI4med	44.185	10.278		10	6.53	0.08	24.86	0.1322
11	1920	Garfagnana	POST985	44.250	10.283		6	5.18	0.16	19.86	0.0530
12	1986	Lunigiana	CSTI1.1	44.277	10.125	5.0	5	4.46	0.10	10.04	0.0530
13	1995	Lunigiana	CSTI1.1	44.366	10.006	13.0	5	4.20	0.11	6.76	0.0569

L'evento più significativo, tra quelli riportati nel catalogo CPTI15 che hanno interessato l'impianto (evidenziati in giallo in Tabella 3.1), è quello della Garfagnana del 1920 (magnitudo di 6,53 e distanza di 24,9 km), con accelerazione stimata pari a 0,13 g. Tale accelerazione, con riferimento alla classificazione normativa, corrisponde ad un evento con periodo di ritorno di circa 140 anni.

4. CARATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA DELL'AREA

4.1 Inquadramento geologico strutturale

Dal punto di vista geologico, il sito di Lago Verde è ubicato nel settore nord-occidentale dell'Appennino settentrionale e, in particolare, a nord-est della Lunigiana, nel versante nordorientale della dorsale appenninica, in posizione molto prossima dello spartiacque regionale.

L'Appennino settentrionale è parte di una catena a thrust e pieghe, originatasi durante il Terziario per l'accavallamento di unità riferibili al dominio interno ligure (unità Liguride e sub-liguride), di origine oceanica, sui domini esterni toscani (Falda Toscana) ed umbro-marchigiani (Carmignani e Kligfield, 1990; Carmignani et al., 2006; Figura 4.1).

Nel settore ad ovest dell'attuale spartiacque appenninico, i processi estensionali hanno causato la creazione di bacini intramontani (Martini e Sagri, 1993; Argnani et al., 2003), la cui iniziale formazione è messa in relazione all'attività di faglie estensionali a basso angolo immergenti verso NE e verso SW (Carmignani e Kligfield, 1990; Barchi et al., 1998; Argnani et al., 2003). Tra i bacini estensionali, quelli situati più ad ovest si sono individuati fino dal tardo Miocene e sono caratterizzati da un riempimento continentale che evolve verso facies marine (Miocene finale-Pliocene), mentre i bacini più orientali (includenti quelli della Lunigiana) si sono formati nel Plio-Quaternario e sono stati sede di sedimentazione di successioni continentali fluviali e lacustri (Bernini e Papani, 2002; Martini e Sagri, 1993). I depositi marino-continentali pliocenici ospitati nei graben sono stati, quindi, incisi dalla rete idrografica, che si è approfondita in risposta al sollevamento quaternario dell'orogene (Bartolini et al., 1982).

La diga di Lago Verde e il lago omonimo sono ubicati nella dorsale di M. Orsaro-M. Acuto che, come alto morfostrutturale, borda verso NE il graben della Lunigiana. La dorsale è costituita, nella parte assiale, dalla successione riferita in letteratura all'unità tettonica della Falda Toscana (ad es. Carmignani e Kligfield, 1990; Bernini e Papani, 2002; Carmignani et al., 2006; Bonini e Pertusati, 2011; ISPRA, 2016; Molli et al., 2018), rappresentata dai terreni della Formazione del Macigno (ISPRA, 2016).

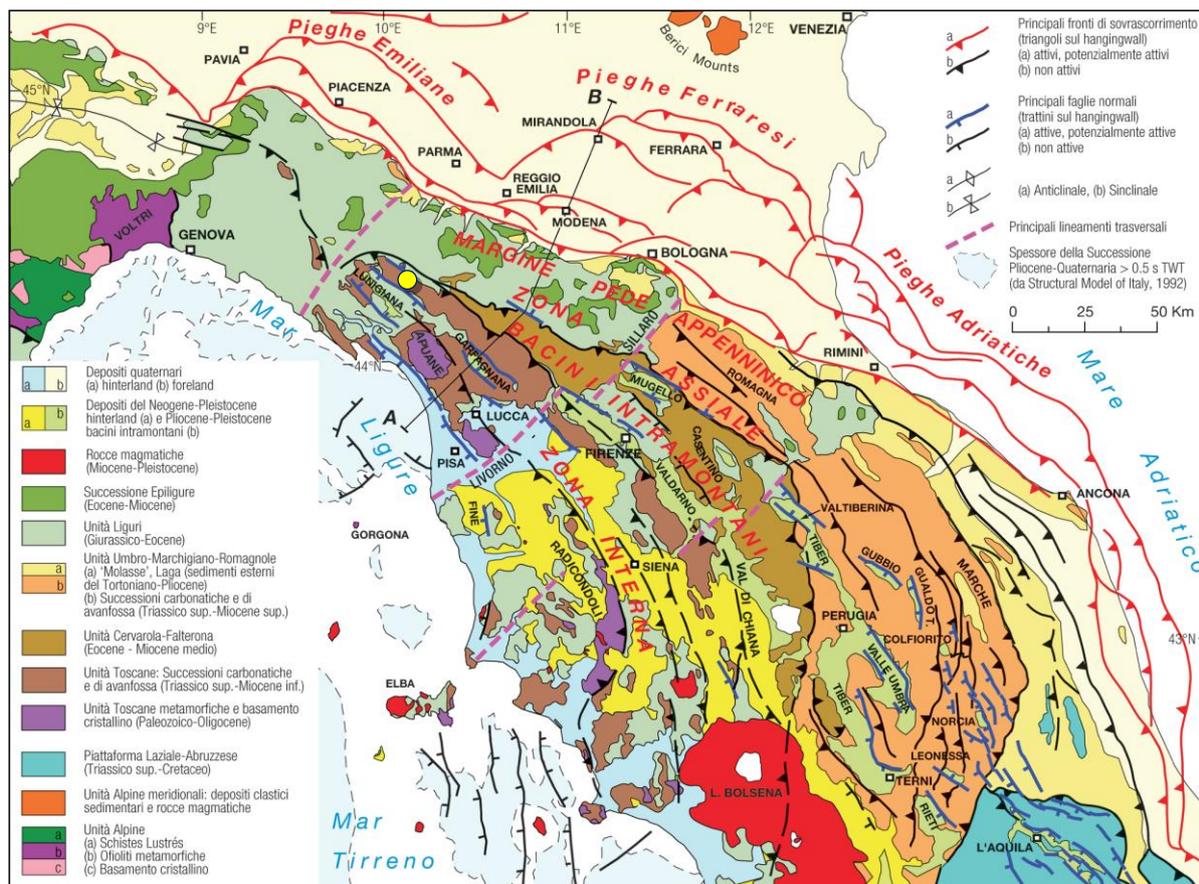


Figura 4.1 Schema tettonico dell'Appennino settentrionale. Da Martelli et al. (2017). Il simbolo giallo indica l'ubicazione dello sbarramento, a nord-est della Lunigiana

4.2 Quadro sismotettonico delle regioni della Garfagnana e Lunigiana

L'area della Lunigiana corrisponde ad una delle regioni più attive sismicamente dell'Appennino settentrionale. Essa ricade nell'area epicentrale di numerosi terremoti storici di intensità da moderata a forte (Rovida et al., 2019; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>; Figura 4.2), tra i quali i più intensi sono avvenuti nel 1481 (Mw = 5,6), 1834 (Mw = 5,96), 1837 (Mw = 5,94), e nel 1920.

In particolare, la sequenza sismica del 1920 è stata caratterizzata da due eventi con magnitudo da moderata a forte, avvenuti rispettivamente il 6 settembre (Mw = 5,61) e il 7 settembre (Mw = 6,53).

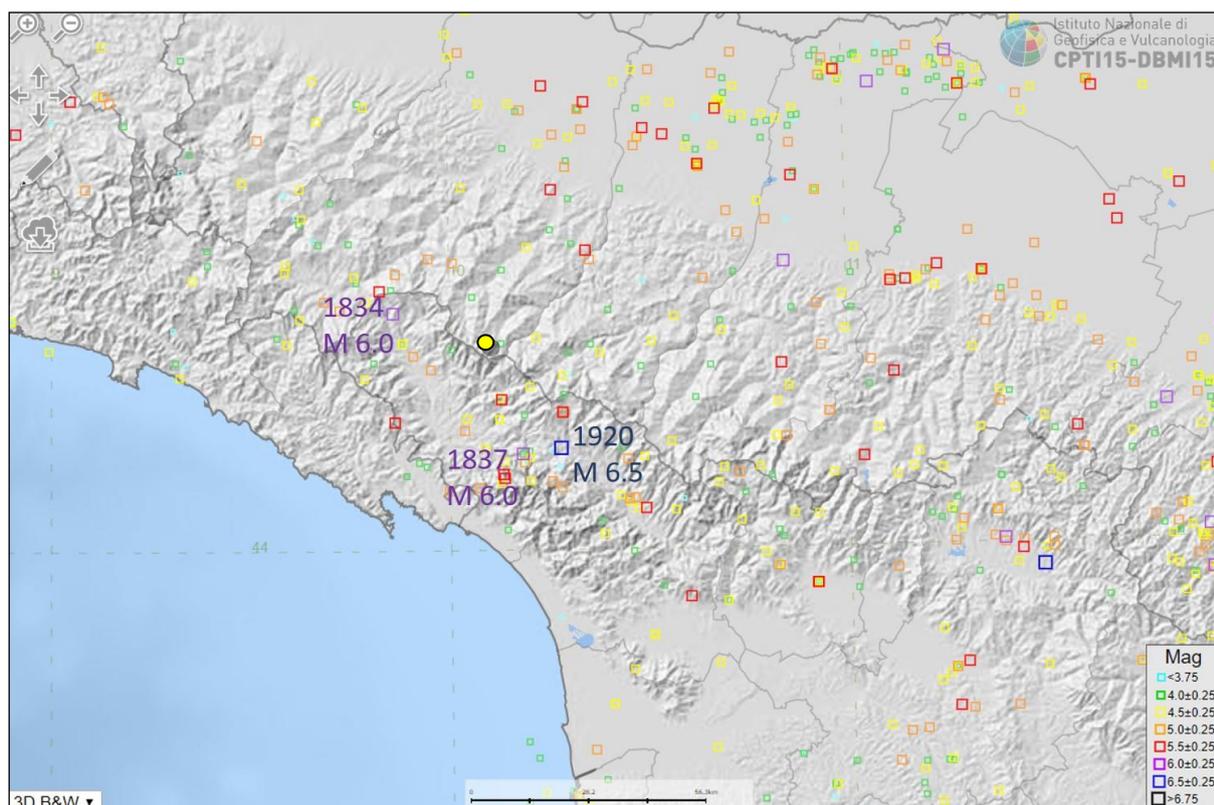


Figura 4.2 Sismicità storica della Lunigiana, da CPTI15-DBMI15 (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), con indicazione dei principali terremoti storici. Il simbolo giallo indica l'ubicazione della diga di Lago Verde (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

Nelle seguenti figure sono riportate le intensità macrosismiche per i principali eventi sismici che hanno interessato l'area di Lago Verde, derivate dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2015 (Rovida et al., 2019) e dalla letteratura scientifica. In particolare, sono riportati gli eventi del 1481, nel 1834, nel 1837 e nel 1920. Come si può notare, le intensità macrosismiche registrate in aree prossime al sito di Lago Verde hanno raggiunto anche il IX grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (terremoto del 1920, Mw 6.53).

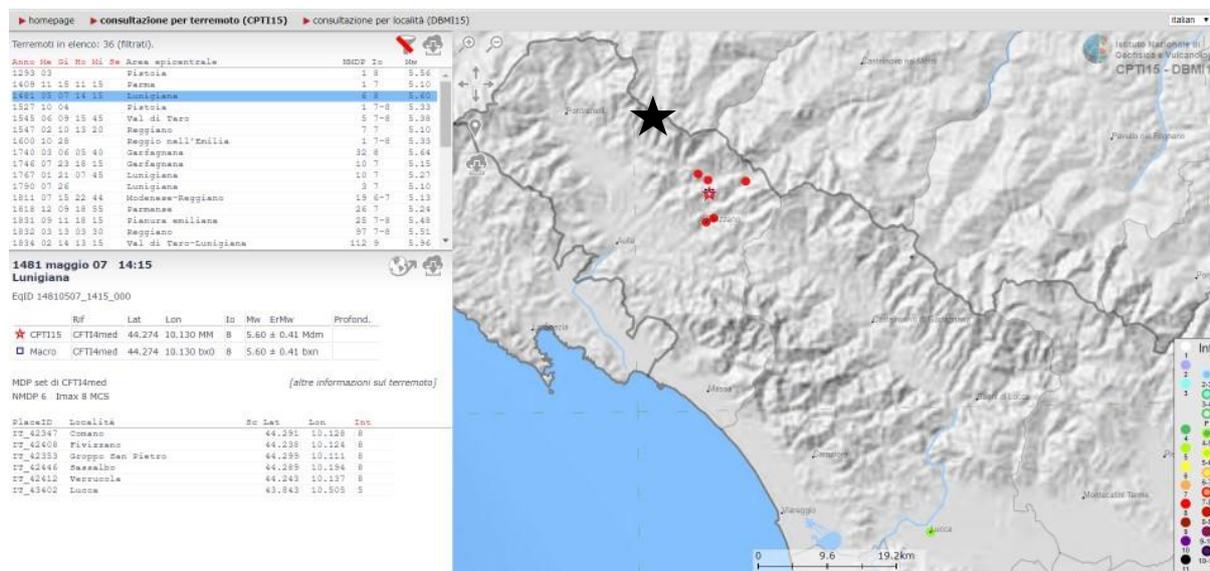


Figura 4.3 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1481 (Mw = 5.6). Il sito di Lago Verde è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

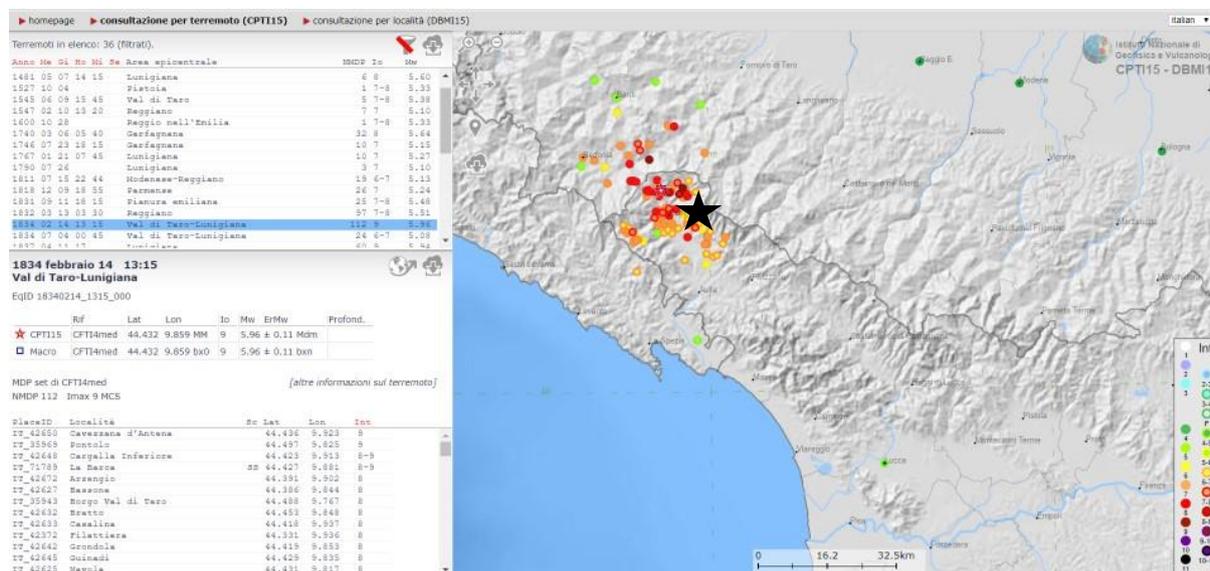


Figura 4.4 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1834 (Mw = 5.96). Il sito di Lago Verde è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

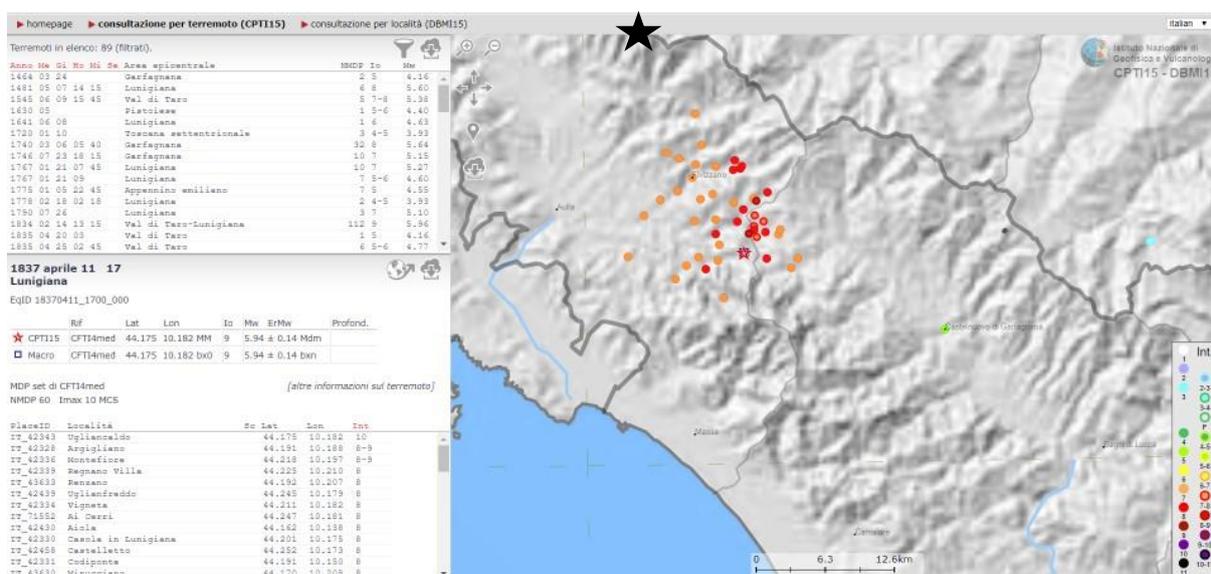


Figura 4.5 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1837 (Mw = 5.94). Il sito di Lago Verde è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

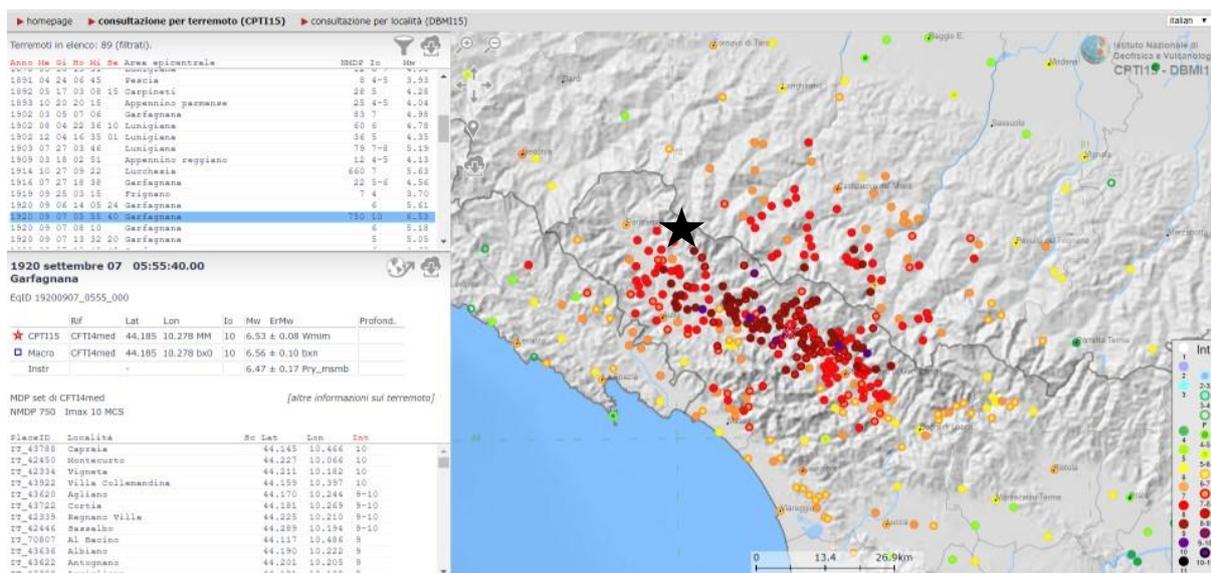


Figura 4.6 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1920 (Mw = 6.53). Il sito di Lago Verde è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

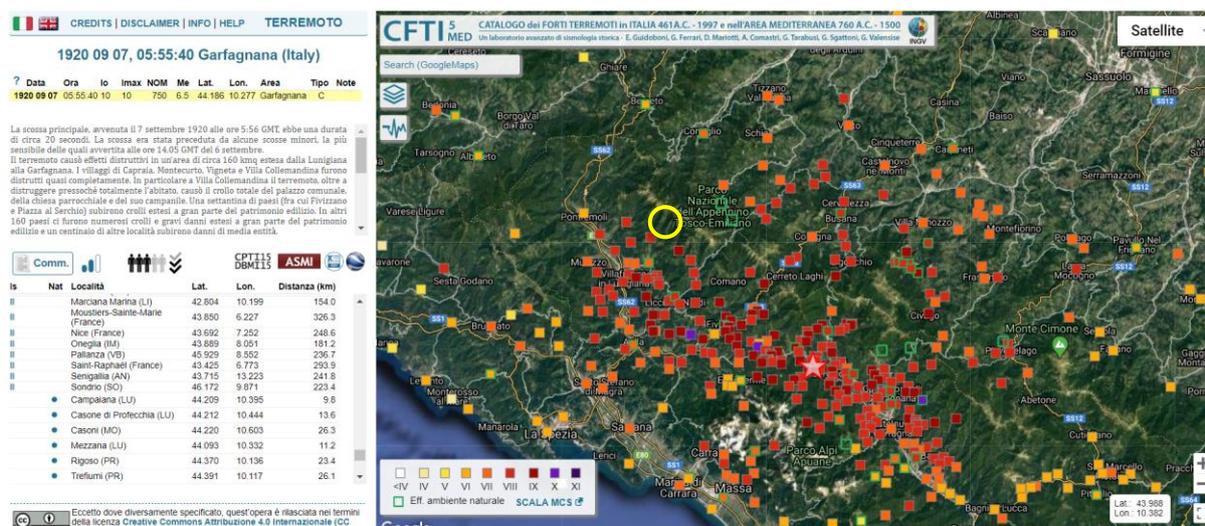


Figura 4.7 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1920 (Mw = 6.53). Il sito di Lago Verde è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

Negli ultimi decenni, la regione in esame è stata interessata da sciami sismici e più terremoti di moderata energia quali quelli avvenuti nel 1995 (con M 4,9) e 2006 in Lunigiana, nel 2000 e gennaio 2013 (M 4,8) in Garfagnana, e quello del giugno 2013 (M 5,1) al confine Lunigiana-Garfagnana (Pezzo et al., 2014; Stramondo et al., 2014; Scafidi et al., 2015; ISIDe working group, 2016; Figura 4.8). Eva et al. (2014), dall'analisi della sismicità registrata nella zona occidentale dell'Appennino settentrionale nel periodo 1999–2011, evidenziano che essa interessa la Lunigiana e si concentra lungo la terminazione settentrionale della dorsale delle Apuane, mentre in Garfagnana si localizzano pochi eventi interposti tra i settori nord e sud della Valle del Serchio Scafidi et al. (2015), dall'analisi della sismicità della regione occidentale dell'Appennino settentrionale nel periodo 1982–2013 (Figura 4.9), evidenziano che i più forti terremoti (1995 e giugno 2013) degli ultimi decenni, come i principali terremoti storici, si localizzano al margine settentrionale delle Alpi Apuane; a sud di quel settore un'altra area sismica si individua nella zona di giunzione tra i sistemi di faglia della Garfagnana nord e sud, dove si sono localizzate le sequenze del 2000 e del gennaio 2013 (vedi anche ISIDe working group, 2016; Figura 4.8).

L'esame degli eventi sismici che hanno interessato la Lunigiana dal 1985 evidenzia una microsismicità nelle vicinanze del sito dello sbarramento di Lago Verde, con magnitudo massima pari a 2.3 (Figura 4.9).

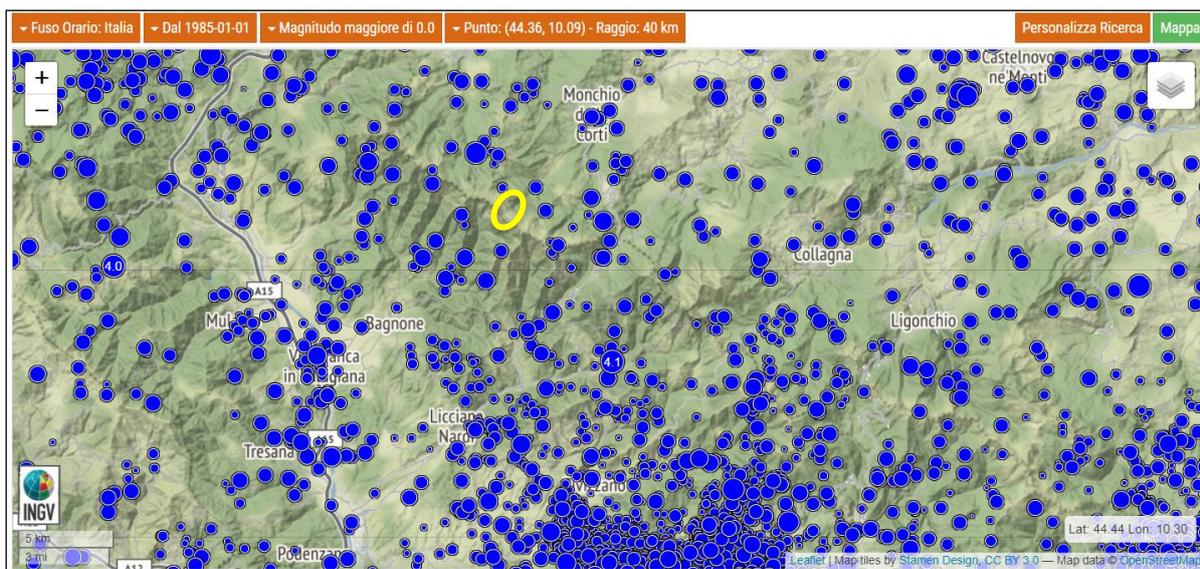


Figura 4.8 Sismicità nella Lunigiana dal 1° gennaio 1985 al 28 Marzo 2020. Da database ISIDE (ISIDE working group, 2016) - <http://cnt.rm.ingv.it/>. Il sito relativo allo sbarramento di Lago Verde è mostrato nell'ellisse giallo

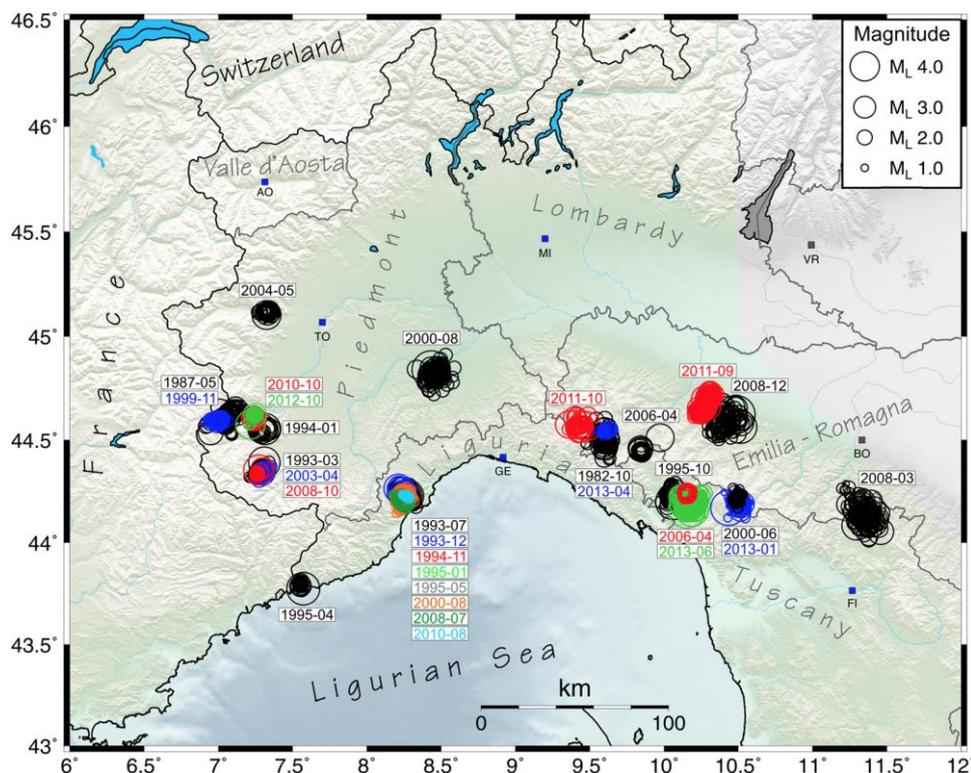


Figura 4.9 Ubicazione e date delle più significative sequenze sismiche (con più di 20 eventi in 24 ore) che hanno interessato l'Italia nordoccidentale tra il 1982 e il 2013. Le sequenze del 2000 e 2013 sono localizzate nel margine orientale della Valle del Serchio. Da Scafidi et al. (2015)

4.3 Sorgenti sismogenetiche

La sismicità delle regioni della Lunigiana e Garfagnana è attribuita da più autori al campo di stress estensionale con direzione di estensione NE-SW, riconosciuto attivo nella regione da dati sismologici, GPS e misure di stress in pozzi (ad es., Montone et al., 2004; Pondrelli et al., 2006; Chiarabba et al., 2005; Devoti et al., 2011). In particolare, i meccanismi focali indicano che la sismicità, come quella di tutta la fascia tirrenico-assiale della catena appenninica, è riferibile ad un regime prevalentemente estensionale, guidato da una estensione orientata in direzione NE-SW (Figura 4.10) e i dati GPS relativi all'intero Appennino settentrionale (Serpelloni et al., 2006; Devoti et al., 2011; Bennett et al., 2012; Cenni et al., 2012) indicano in generale movimenti orizzontali verso N-NE. In particolare, dai valori degli spostamenti orizzontali, Viti et al. (2015) distinguono, nell'intero Appennino settentrionale, tre fasce parallele all'asse della catena: la zona interna, con velocità minime (0,5÷2 mm/a) verso E÷ENE nella parte ligure e tra NW e NE nella parte tirrenica; la zona assiale, comprendente l'alto Appennino tosco-emiliano e tosco-romagnolo e i bacini intermontani toscani, con velocità di 1÷3 mm/a verso N÷NNE; la zona esterna, comprendente i fronti padani sepolti e il basso appennino emiliano-romagnolo, caratterizzata da velocità nell'ordine di 2÷6 mm/a verso NNE÷NE, con i valori maggiori nella parte centrale e in quella orientale.

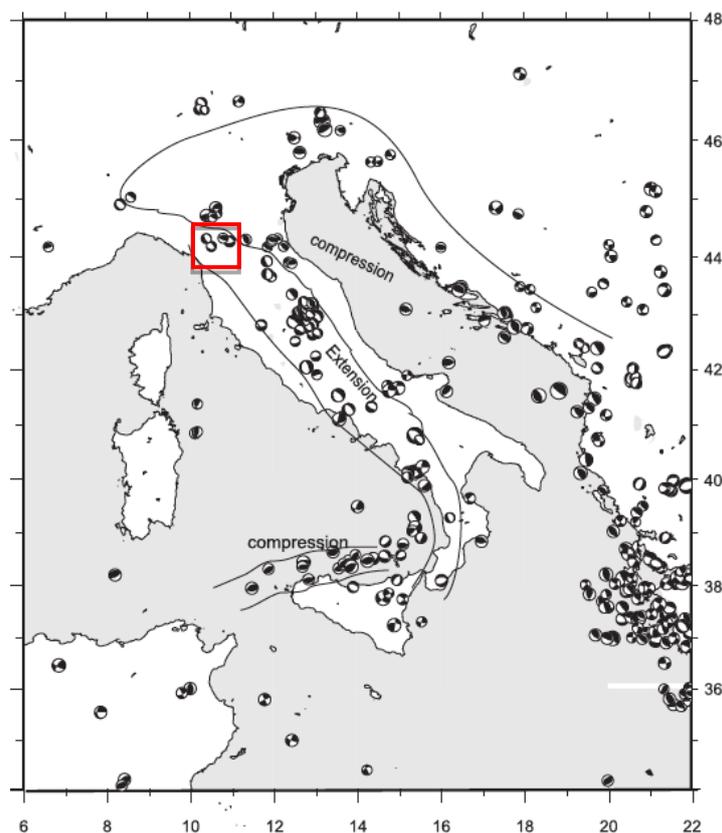


Figura 4.10 Sismicità nel periodo 1976-2002 e meccanismi focali dei terremoti con $M \geq 4.5$. Da Chiarabba et al. (2005)

Il regime estensionale guidato da estensione NE-SW è ritenuto responsabile dell'attivazione dei sistemi di faglie estensionali localizzati ai bordi del graben della Val di Magra e alla zona di faglia di direzione NE-SW (o E-W, per alcuni autori) che separa il graben della Lunigiana, a nord, da quello della Garfagnana, a sud (Barchi et al., 1998; Boncio et al., 2000; Eva et al., 2014; DISS Working Group, 2018).

I sistemi di faglie che bordano verso occidente i graben della Lunigiana e Garfagnana, sono interpretati come la terminazione occidentale di un sistema regionale di faglie a basso angolo con immersione verso NE (Etrurian Fault System in Boncio et al., 2000) che si estende lungo l'intero Appennino centro-settentrionale (Barchi et al., 1998; Boncio et al., 2000; Figura 4.11), considerato attivo e responsabile della sismicità storica e recente della regione (Boncio et al., 2000).

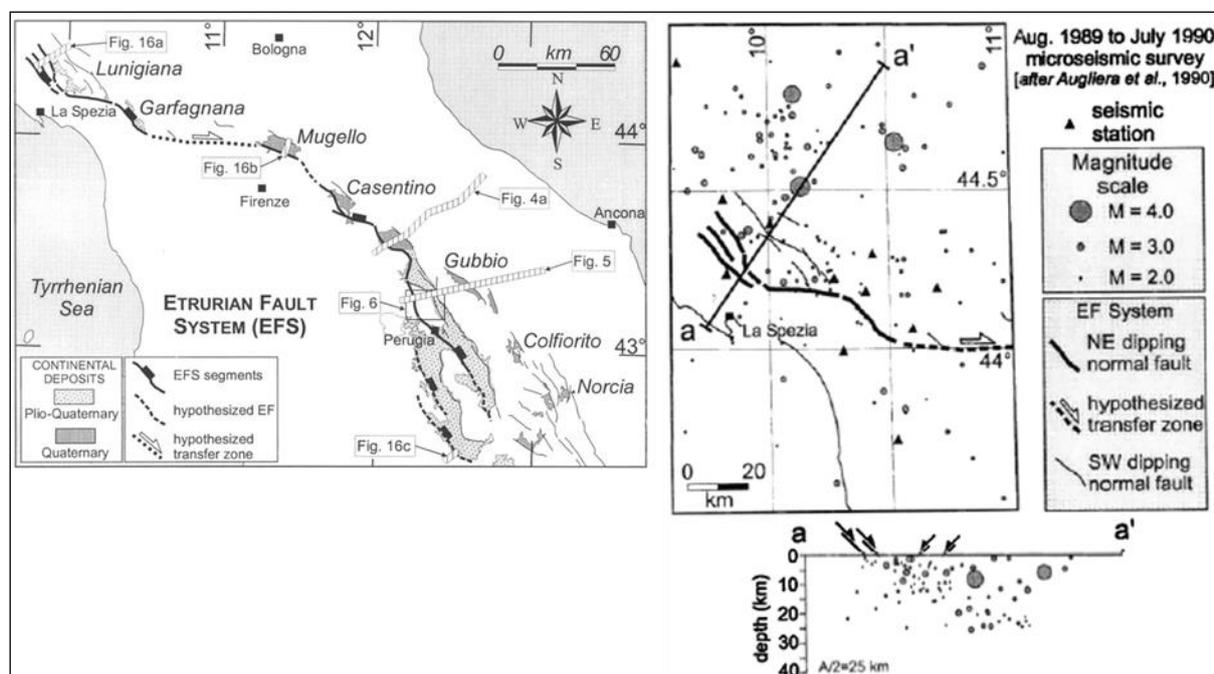


Figura 4.11 Assetto tettonico e sismicità dell'Appennino settentrionale e dei bacini toscani, con indicazione dell'Etrurian Fault System (EFS). Sono evidenziati gli epicentri dei terremoti del 1837 e 1920. Figure tratte da Boncio et al. (2000)

In sostanziale accordo con tale interpretazione, i compilatori del database DISS (<http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>) attribuiscono la sismicità dell'area della Garfagnana e di quella della Lunigiana all'attività di due sistemi di faglie normali con direzione NW-SE e immersione verso NE, che danno luogo alle sorgenti sismogenetiche composite ITCS026 – Lunigiana (a nord) e ITCS083 – Garfagnana (a sud) (Figura 4.12). Le sorgenti individuali appartenenti alla ITCS026 – Lunigiana più prossime al sito dell'impianto sono le sorgenti ITIS067 – Aulla e ITIS085 – Pontremoli, di cui alla prima è associato il terremoto del 1481 e alla seconda quello del 1834 (vedi schede in Figura 4.13 e Figura 4.14); invece, la sorgente individuale appartenente alla ITCS083 – Garfagnana prossima al sito d'interesse è la ITIS050 – Garfagnana North, a cui è associato il terremoto del 1920 (vedi scheda in Figura 4.15).

La sorgente composita ITCS026 – Lunigiana è interpretata, sulla base dei risultati dello studio condotto dall'unità di ricerca coordinata dal Prof. Paolo Scandone nell'ambito dei Progetti INGV-DPC S2 (*report non reperito con il presente studio*), come una struttura estensionale immergente a basso angolo verso NE corrispondente alla master fault del graben della Lunigiana (le faglie immergenti verso SW sono interpretate come antitetiche) e classificata come "faglia con attività recente"; essa corrisponde al sistema di Mulazzo di Bernini e Papani (2002) (DISS Working Group, 2018; <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>).

La sorgente composita ITCS083 – Garfagnana è, analogamente, una struttura estensionale situata nel bordo sudoccidentale della Valle del Serchio, che immerge a basso angolo verso NE e

corrisponde alla master fault del graben della Garfagnana (DISS Working Group, 2018; <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>).

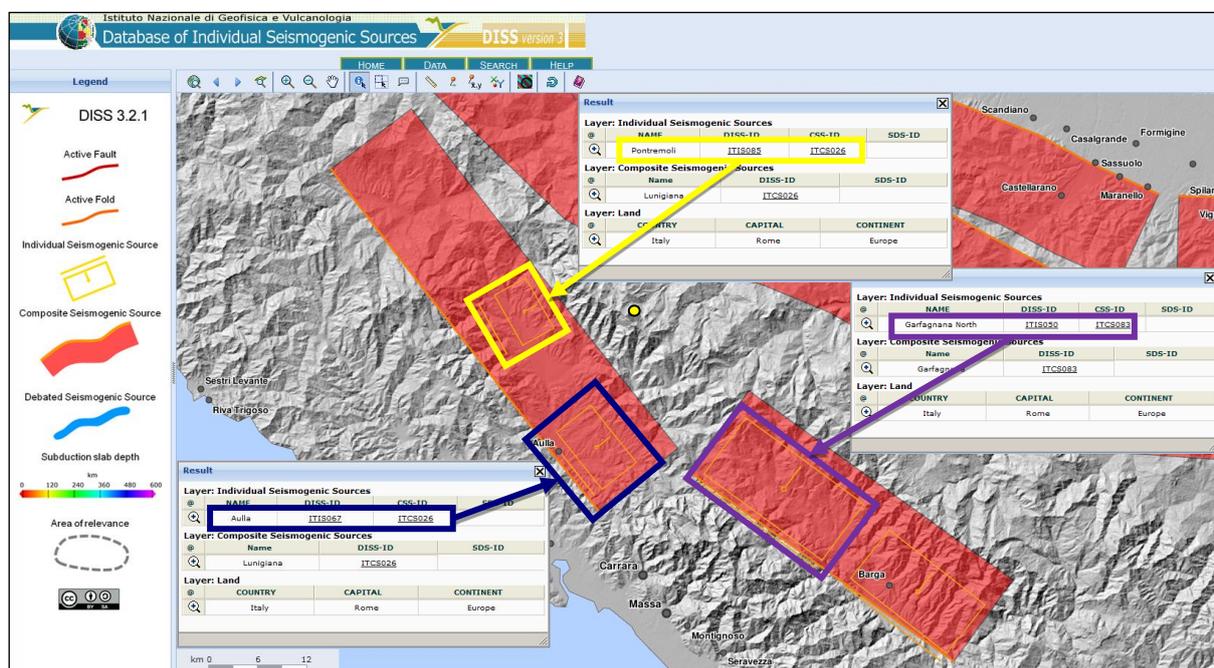


Figura 4.12 Strutture sismogenetiche nella regione d'interesse: in giallo la sorgente individuale ITIS085 – Pontremoli, in marrone la sorgente individuale ITIS067 – Aulla, appartenenti alla sorgente composita ITCS026 – Lunigiana; in viola la sorgente individuale ITIS050 – Garfagnana North, appartenente alla sorgente composita ITCS083 – Garfagnana. L'ubicazione del sito dello sbarramento di Lago Verde è indicata dal simbolo giallo. Fonte: INGV, Database DISS, <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Database of Individual Seismogenic Sources DISS version 3

User: Guest | [Login](#)
[HOME](#) [MAP](#) [SEARCH](#) [HELP](#)

INDIVIDUAL SEISMOGENIC SOURCES

[COMMENTARY](#) | [PICTURES](#) | [REFERENCES](#) | [USER COMMENTS](#)

GENERAL INFORMATION

DISS-ID	ITIS085
Name	Pontremoli
Compiler(s)	Burrato P.(1), Vannoli P.(1), Gambini S.(1)
Contributor(s)	Burrato P.(1), Vannoli P.(1), Gambini S.(1), Basili R.(1), Baroux E.(1), Valensise G.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	01-Nov-2005
Updated	02-Oct-2007
Display map ...	
Related sources	ITCS026

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.37 / 9.91	OD Based on geological data.
Length [km]	7.1	OD Based on geological and geomorphological data.
Width [km]	5.9	ER Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	2.0	OD Based on geological and seismological data.
Max depth [km]	5.9	OD Based on geological and seismological data.
Strike [deg]	329	LD Based on geological data from various authors.
Dip [deg]	42	LD Based on seismological data from Solarino (2007).
Rake [deg]	270	LD Based on geological data from various authors.
Slip Per Event [m]	0.3	ER Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min...max	0.1...1.0	EJ Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	300...3000	EJ Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	5.7	LD Value adopted from the historical earthquake catalogue CPTI04.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

INFORMATION ABOUT THE ASSOCIATED EARTHQUAKES

Latest Earthquake	14 Feb 1834	CPTI04.
Penultimate Earthquake	Unknown	See "Commentary" for information.

Figura 4.13 Informazioni generali e parametri della sorgente ITIS085 – Pontremoli. Fonte: INGV, Database DISS, <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Database of Individual Seismogenic Sources DISS version 3

User: Guest | [LOGIN](#)
[HOME](#) [MAP](#) [SEARCH](#) [HELP](#)

INDIVIDUAL SEISMOGENIC SOURCES

[COMMENTARY](#) ▾ | [PICTURES](#) ▾ | [REFERENCES](#) ▾ | [USER COMMENTS](#) ▾

GENERAL INFORMATION

DISS-ID	ITIS067
Name	Aulla
Compiler(s)	Burrato P.(1)
Contributor(s)	Burrato P.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	02-Oct-2007
Updated	02-Oct-2007

Display map ... 

Related sources [ITCS026](#)

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE	
Location [Lat/Lon]	44.22 / 10.03	OD	Primarily based on the location of the associated historical earthquake.
Length [km]	9.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
Width [km]	7.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
Min depth [km]	1.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
Max depth [km]	5.5	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
Strike [deg]	320	OD	Based on geological data from various authors.
Dip [deg]	40	OD	Based on seismological data from Solarino (2007).
Rake [deg]	270	LD	Based on geological data from various authors.
Slip Per Event [m]	0.3	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min... max	0.1...1.0	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	300...3000	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	5.8	LD	Value adopted from the historical earthquake catalogue CPT104.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

INFORMATION ABOUT THE ASSOCIATED EARTHQUAKES

Latest Earthquake	05 May 1481	CPT104.
Penultimate Earthquake	Unknown	See "Commentary" for information.

Figura 4.14 Informazioni generali e parametri della sorgente ITIS067 – Aulla. Fonte: INGV, Database DISS, <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
 Database of Individual Seismogenic Sources DISS version 3

User: Guest | LOGIN HOME MAP SEARCH HELP

INDIVIDUAL SEISMOGENIC SOURCES

COMMENTARY PICTURES REFERENCES USER COMMENTS

GENERAL INFORMATION

DISS-ID	ITIS050
Name	Garfagnana North
Compiler(s)	Vannucci G.(1), Valensise G.(2)
Contributor(s)	Vannucci G.(1), Valensise G.(2)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione di Bologna; Via Donato Creti, 12, 40128 Bologna, Italy 2) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	31-Oct-2001
Updated	31-Oct-2001
Display map ...	
Related sources	ITCS083

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE	
Location [Lat/Lon]	44.18 / 10.32	LD	Primarily based on the location of the associated historical earthquake.
Length [km]	18.0	OD	Based on geological and geomorphological data.
Width [km]	11.3	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	1.0	OD	Based on geological and geomorphological data.
Max depth [km]	8.3	AR	Derived from dip, width and min depth.
Strike [deg]	305	OD	Based on geological and geomorphological data.
Dip [deg]	40	OD	Based on geological and geomorphological data.
Rake [deg]	270	EJ	Inferred from geological data.
Slip Per Event [m]	0.79	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min... max	0.1...1.0	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	790...7900	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	6.4	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

INFORMATION ABOUT THE ASSOCIATED EARTHQUAKES

Latest Earthquake	07 Sep 1920	CPT104.
Penultimate Earthquake	Unknown	See "Commentary" for information.

Figura 4.15 Informazioni generali e parametri della sorgente ITIS050 – Garfagnana North. Fonte: INGV, Database DISS, <http://diss.rm.ingv.it/dissnet/>

L'interpretazione sismotettonica del DISS è condivisa da Eva et al. (2014), che associano la sismicità della Lunigiana nel periodo 1999-2011 ad una struttura sismogenetica immergente verso NE ubicata lungo il bordo SW del graben (Figura 4.16).

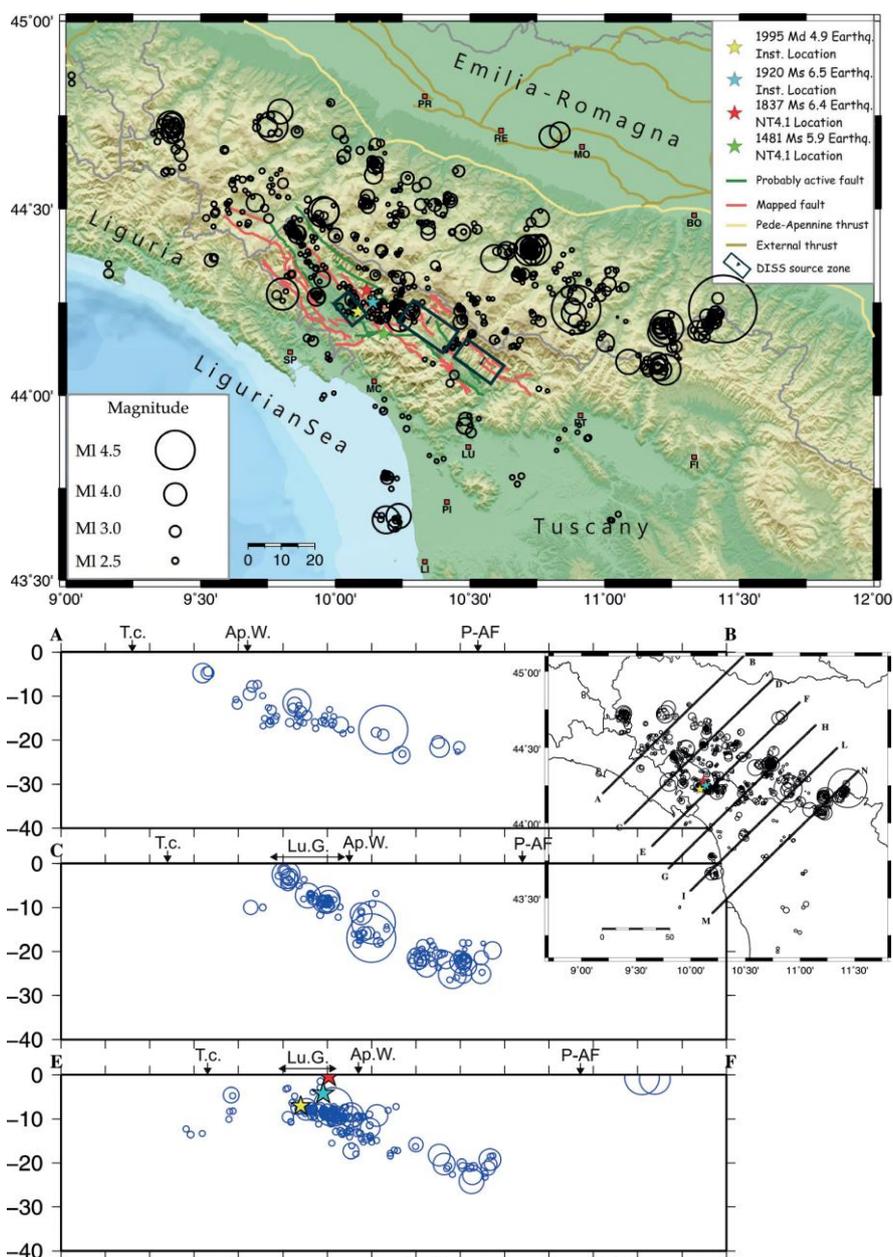


Figura 4.16 A sinistra: Sismicità nel periodo 1999 – 2011, con indicazione dei principali terremoti storici, delle faglie attive [da Di Naccio et al., 2013] e sorgenti sismogenetiche [da database DISS 3.1]. A destra: sezioni sismologiche orientate SW-NE attraverso l'appennino tosco-emiliano, con indicazione dei principali terremoti storici (stella gialla: 1995; stella azzurra: 1920; stella rossa: 1837); T.c. = costa tirrenica; Ap.W. = spartiacque appenninico; P-AF = fronte dei thrust pedeappenninico; Lu.G. = graben della Lunigiana. Da Eva et al. (2014), modificato

Il terremoto più recente che ha interessato la regione, ovvero quello con meccanismo focale di tipo dip-slip con debole componente trascorrente destra avvenuto il 21 giugno 2013, è attribuito all'attivazione della struttura ad orientazione circa E-W/NE-SW che connette i sistemi di faglia ai bordi sudoccidentali dei graben della Lunigiana e della Garfagnana (Pezzo et al., 2014; Stramondo et al., 2014; Figura 4.17; Figura 4.17).

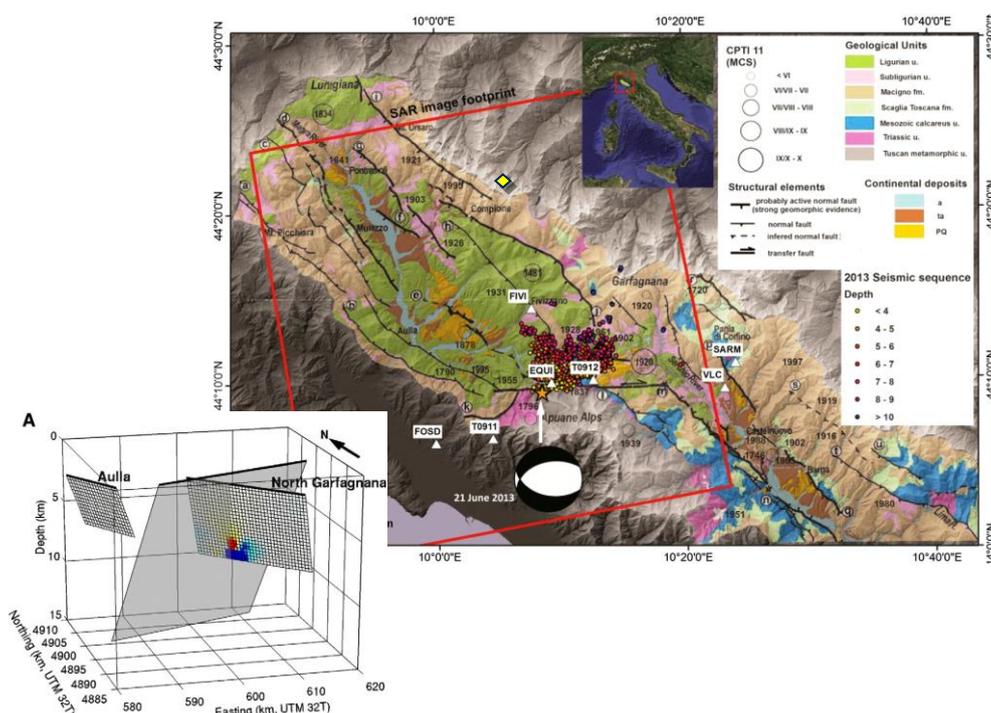
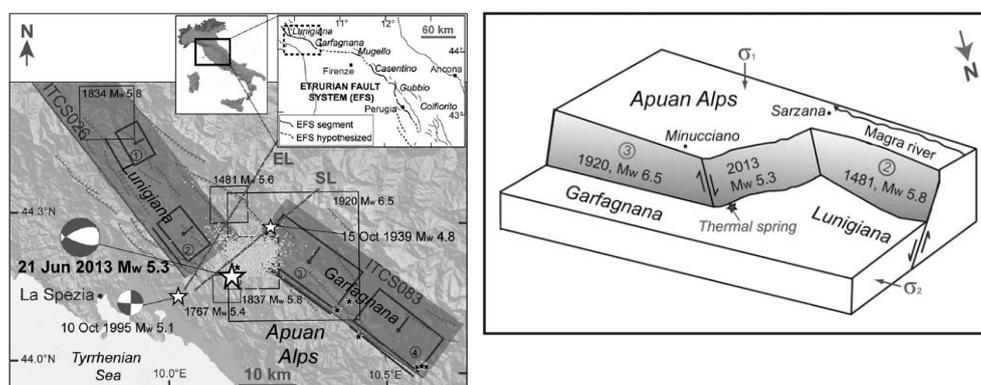


Figura 4.17 Carta geologico-strutturale della regione Lunigiana-Garfagnana [da Di Naccio et al., 2013] con indicazione della sismicità storica [da CPTI11; Rovida et al., 2011] e della sequenza sismica del 2013 con il meccanismo focale del terremoto del 21 Giugno. Lo schema in basso a sinistra rappresenta l'immagine 3D, con vista da SW, della sorgente del terremoto del 21 giugno 2013. Da Pezzo et al. (2014). Il simbolo in giallo indica l'ubicazione del sito della diga di Lago Verde



Structural sketch of the Lunigiana and Garfagnana area with the June 21, 2013 earthquake, its focal mechanism (<http://cnt.rm.ingv.it/dmt.html>) and the 2013 sequence [4]. Squares: historical earthquakes having magnitude larger than 5.3 [12]; hatched lines: normal faults [21]; dashed lines: lineaments, EL: Enza line [23], SL: Sarzana-Equi Terme line [3]; dark polygon: composite seismogenic sources projection on the ground surface; black boxes: individual seismogenic sources projection onto the ground surface; black lines: up-dip projection of the seismogenic sources onto the surface 1) ITIS085-Pontremoli; 2) ITIS067-Aulla; 3) ITIS050-Garfagnana North; and 4) ITIS051: Garfagnana South [2]; black stars: thermal springs. Inset shows the structural framework of the Etrurian Fault System (redrawn from [1]).

Figura 4.18 Interpretazione sismotettonica della sismicità registrata al confine Lunigiana-Garfagnana con indicazione delle principali sorgenti sismogenetiche dell'area (tratte da DISS) e block-diagram che mostra la geometria semplificata dell'area Lunigiana-Garfagnana. La sorgente del terremoto del 1481 è associata alla faglia bordiera sudoccidentale del graben della Lunigiana ed è schematicamente legata alla sorgente del terremoto del 1920 attraverso la relay ramp cui è associata la sequenza del giugno 2013. Immagini da Stramondo et al. (2014)

5. STUDIO SISMOTETTONICO E ANALISI PROBABILISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA

5.1 Modello sismotettonico

5.1.1 Introduzione

Il modello sismotettonico è stato definito individuando *le informazioni migliori, più attendibili e aggiornate* in accordo alle indicazioni delle linee guida redatte ai sensi dell'articolo 15 della 241/90 e successive modifiche tra la Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture Idriche ed Elettriche del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti e l'Istituto di Geofisica e Vulcanologia (INGV), INGV-MITDGUD.

La definizione del modello sismotettonico parte assumendo, quale studio di riferimento per la pericolosità italiana, il cosiddetto modello MPS04 (Stucchi et al 2011, Meletti 2007), che è alla base della valutazione delle azioni sismiche per strutture e infrastrutture secondo le norme correnti.

A partire dall'impianto di tale modello si sono poi valutati gli aggiornamenti relativi alla caratterizzazione delle sorgenti sismiche, secondo i dati più aggiornati e la letteratura più accreditata a disposizione.

Gli elementi principali dello studio sono riepilogati in elenco, rimandando per maggiori dettagli ai paragrafi seguenti.

Il modello assunto per la definizione delle sorgenti sismiche è il modello a zone sismogenetiche noto come ZS9 (Meletti et al. 2008). Tale modello è il più recente pubblicato che copre con dettaglio omogeneo e coerente tutti i siti di interesse di questo studio; inoltre, esso è riconosciuto dalla comunità scientifica ed è, come citato, alla base delle norme tecniche per le costruzioni.

La stima dei parametri di pericolosità sismica di ciascuna zona è basata sulla versione del 2015 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) (Rovida et al. 2016). È noto che il calcolo ufficiale di pericolosità sismica nazionale faccia riferimento alla versione del catalogo del 2004, CPTI04. Tuttavia, la recente pubblicazione del catalogo aggiornato al 2014 che, non solo contiene gli eventi sismici recenti, ma per il quale sono state aggiornate le stime delle magnitudo dei terremoti storici, rende necessario, oltre che opportuno, l'aggiornamento dei parametri di sismicità delle zone.

Per quanto riguarda l'eliminazione delle repliche (*declustering*) e la stima della completezza del catalogo CPTI15, ci si è avvalso del lavoro Meletti et al 2009 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e i cui autori sono gli studiosi italiani più autorevoli sul tema.

Il modello sismotettonico è stato definito per una macroarea che include tutte le zone della zonazione ZS9 nell'area centro-settentrionale (Figura 5.1).

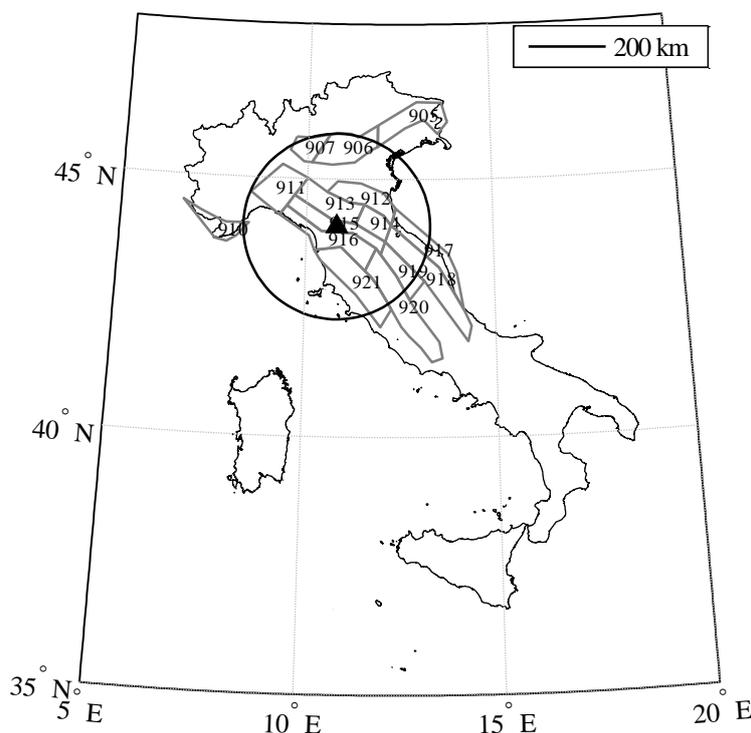


Figura 5.1. Localizzazione del sito e zone sismogenetiche che contribuiscono alla pericolosità sismica

5.1.2 Modello di zonazione

Il modello a zone sismogenetiche ZS9 copre con dettaglio omogeneo e coerente tutto il territorio italiano.

La scelta di utilizzare zone sismogenetiche omogenee invece che faglie sismiche, è stata operata per ragioni di affidabilità del modello ZS9 in quanto la conoscenza delle faglie sismiche non è attualmente sufficiente, nonostante i recenti studi sul tema, da permettere di basare l'analisi di pericolosità esclusivamente sulle faglie. Si ritiene quindi valido l'utilizzo di aree/zone sismogenetiche omogenee, che, sulla base di indizi geologici, sismotettonici e sulla sismicità storica, si possono ritenere caratterizzate da un tasso di sismicità, cioè il numero medio di terremoti annui con una magnitudo superiore a un valore minimo di interesse, uniforme in tutta la zona.

Il modello di zone sismogenetiche ZS9 prende in considerazione 36 zone sismogenetiche identificate da un numero progressivo che va da 901 a 936 sulla base di informazioni derivate da (i) i terremoti passati, (ii) le strutture sismogenetiche contenute nel DISS 2.0 (Database of Italy's Seismogenic Sources o DISS 2.0) (Valensise e Pantosti 2001), (iii) le altre faglie attive note all'epoca della sua redazione.

In accordo con il concetto di zona sismogenetica, nel seguito si assumono le seguenti ipotesi classiche della analisi probabilistica di pericolosità sismica:

- il processo di occorrenza degli eventi sismici principali (mainshock) su ciascuna zona è stocasticamente ben descritto dal processo di Poisson omogeneo (PPO). Quest'ultimo è

caratterizzato da un singolo parametro o tasso, $v(M \geq M_{min})$, pari al numero medio di terremoti nell'unità di tempo (anno) con magnitudo, M , superiore ad una soglia minima ritenuta di interesse per le strutture, M_{min} ;

- condizionatamente all'occorrenza di un terremoto in una data zona, la distribuzione di probabilità della posizione dell'epicentro è uniforme in tutta l'area della zona (Cornell 1968);
- condizionatamente all'occorrenza di un evento nella zona, indipendentemente dal punto della zona in cui tale evento si genera, la distribuzione di probabilità delle magnitudo dell'evento si può derivare dalla legge di Gutenberg e Richter (Gutenberg e Richter 1944).

5.1.3 Catalogo CPTI15

La stima dei parametri di pericolosità sismica di ciascuna zona è basata CPTI15.

Il nuovo Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) copre un intervallo temporale dall'anno 1000 al 2014 e fa riferimento a modelli di conversione aggiornati per ristimare le magnitudo dei terremoti storici già contenuti nelle precedenti versioni.

In Figura 5.2 sono riportati tutti i 4427 terremoti presenti nel CPTI15; la figura riporta gli epicentri di ciascun evento raffigurati con cerchi di diverso colore e dimensione in funzione della magnitudo momento, M_w , dell'evento considerato. La localizzazione dei terremoti di magnitudo maggiore permette di identificare abbastanza chiaramente la zona che si estende dalla dorsale appenninica all'arco calabro fino alla Sicilia sud-orientale.

Lo stesso catalogo è rappresentato in un diverso formato in Figura 5.3 nella quale si riportano tutti gli eventi rappresentati in funzione dell'anno di occorrenza.

La figura permette di introdurre il concetto di *completezza* del catalogo, in quanto mostra chiaramente come la frequenza dei terremoti osservati diminuisce allontanandosi nel tempo. Tale fenomeno, più evidente al diminuire della classe di magnitudo considerata, evidenzia che che più si va indietro nel tempo, maggiori sono i terremoti di cui si è persa traccia nel catalogo, soprattutto in riferimento alle classi di magnitudo minori.

La rappresentazione dei dati del CPTI15 riportata nelle figure comprende sia terremoti principali che repliche e non tiene in considerazione i diversi intervalli di completezza del catalogo che vanno stimati per classi di magnitudo e per macro-zone geografiche. Questi due aspetti sono analizzati in dettagli nel seguito.

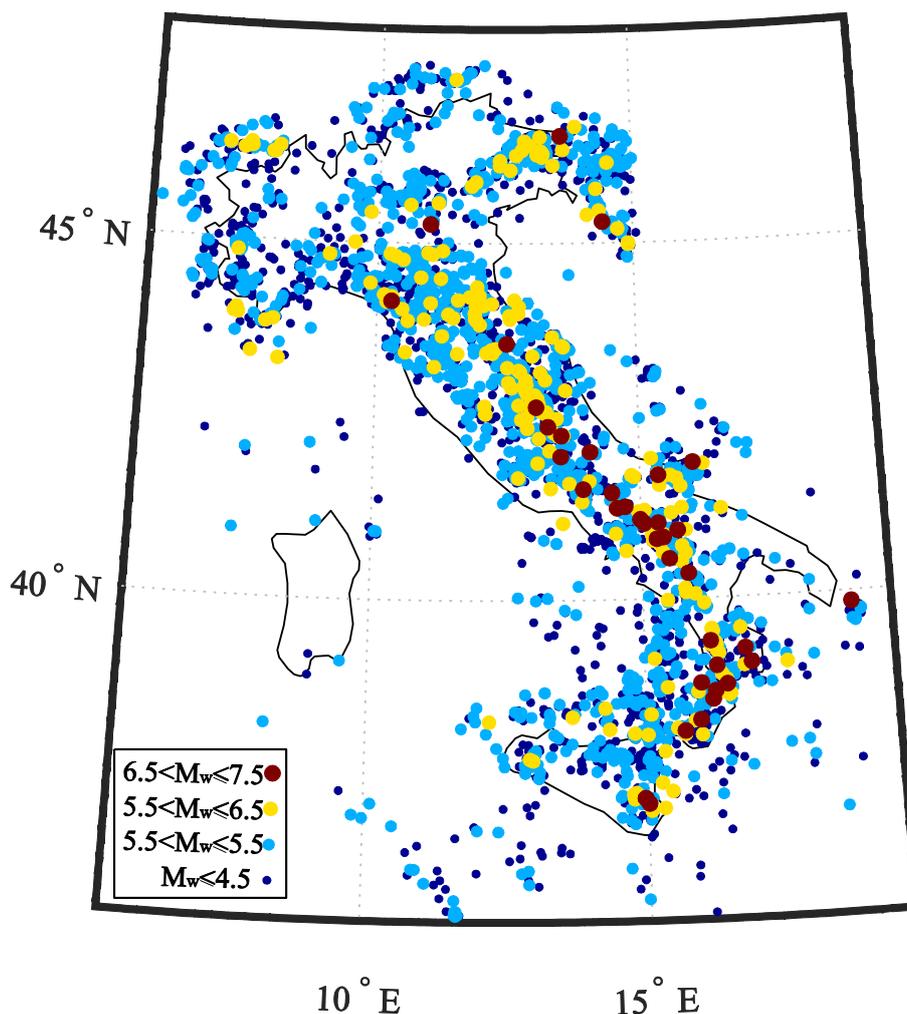


Figura 5.2. Distribuzione geografica ed intensità dei terremoti contenuti nel CPTI15

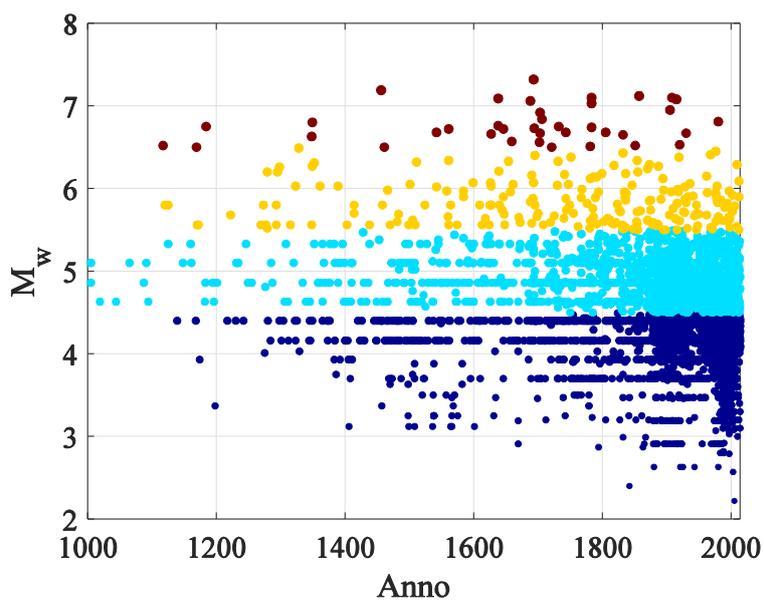


Figura 5.3. Eventi CPTI15 per anno

5.1.4 Tassi per classi di magnitudo

Il catalogo, privo di repliche e completo, è stato utilizzato per stimare i parametri sismici di ciascuna delle 18 zone del modello ZS9 appartenenti alla macroarea in esame.

Per ciascuna zona sono stati quindi stimati i tassi di occorrenza per classi di magnitudo. Tali tassi, per semplicità di rappresentazione riferiti all'unità temporale di cento anni, sono riportati in Tabella 5.1 (completezza storica) e Tabella 5.2 (completezza statistica) insieme con i centri delle classi di magnitudo considerati ed il nome e numero identificativo di ciascuna zona.

Tabella 5.1. Tassi di occorrenza in cento anni secondo completezza storica per classi di magnitudo e per zona sismogenetica

Nome zona	ZS9	Classe di magnitudo (centro intervallo)															
		3,96	4,19	4,42	4,65	4,88	5,11	5,34	5,57	5,8	6,03	6,26	6,49	6,72	6,95	7,18	7,41
Grigioni - Valtellina	903	1,75	1,75	0,70	3,50	1,40	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Friuli - Veneto Orientale	905	7,81	9,55	11,37	9,55	4,49	2,07	1,03	0,41	0,42	0,42	0,22	0,22	0,11	0,00	0,00	0,00
Garda - Veronese	906	3,13	5,06	5,06	2,81	6,18	1,03	0,41	0,21	0,14	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Bergamasco	907	0,00	1,69	1,69	1,69	2,25	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piemonte	908	4,39	10,53	5,59	3,50	2,10	0,64	0,32	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nizza - Sanremo	910	1,75	2,63	4,20	1,40	0,70	0,00	0,32	0,41	0,21	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tortona - Bobbio	911	3,13	7,02	2,10	2,10	2,80	0,55	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dorsale Ferrarese	912	6,25	3,93	5,62	5,06	0,56	1,03	1,65	0,21	0,28	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Emiliano-Romagnolo	913	3,13	9,51	6,17	4,62	2,95	2,75	1,93	0,41	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forlivese	914	3,13	7,19	7,42	7,57	5,18	0,76	0,62	0,48	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Garfagnana - Mugello	915	6,25	20,18	9,79	6,99	6,29	2,47	0,27	0,55	0,00	0,62	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Versilia-Chianti	916	4,69	7,02	4,90	2,10	2,10	1,10	0,82	0,55	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rimini - Ancona	917	6,25	5,82	4,20	2,80	0,00	1,65	0,27	1,10	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medio-Marchigiana/Abruzzese	918	1,56	14,91	9,79	4,20	0,00	0,27	1,10	0,55	0,41	0,00	0,28	0,14	0,00	0,14	0,00	0,00
Appennino Umbro	919	1,56	18,42	10,49	6,99	3,50	3,02	1,37	1,92	0,21	0,62	0,14	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Val di Chiana - Ciociaria	920	3,13	18,42	12,59	6,29	2,80	1,92	0,82	0,27	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etruria	921	6,25	9,65	6,99	6,29	4,90	2,47	1,10	0,00	0,21	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Abruzzese	923	6,25	26,32	20,28	11,89	3,50	3,30	1,37	1,92	1,03	0,41	0,56	0,28	0,14	0,14	0,14	0,00

Tabella 5.2. Tassi di occorrenza in cento anni secondo completezza statistica per classi di magnitudo e per zona sismogenetica

Nome zona	ZS9	Classe di magnitudo (centro intervallo)															
		3,96	4,19	4,42	4,65	4,88	5,11	5,34	5,57	5,8	6,03	6,26	6,49	6,72	6,95	7,18	7,41
Grigioni - Valtellina	903	2,08	2,78	0,69	3,66	1,22	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Friuli - Veneto Orientale	905	6,25	11,81	13,89	10,42	4,17	4,35	2,72	0,62	0,93	0,53	0,35	0,29	0,14	0,00	0,00	0,00
Garda - Veronese	906	2,08	6,25	6,25	2,78	6,94	2,17	0,54	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bergamasco	907	0,00	1,39	2,08	2,08	2,78	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piemonte	908	6,25	9,03	5,56	3,66	1,83	0,49	0,49	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nizza - Sanremo	910	2,08	2,78	4,17	1,22	0,61	0,00	0,49	0,41	0,21	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tortona - Bobbio	911	1,49	6,61	2,24	2,10	2,99	0,45	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dorsale Ferrarese	912	4,86	4,17	6,94	6,25	0,69	0,54	1,63	0,31	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Emiliano-Romagnolo	913	2,83	10,14	7,15	5,12	3,52	4,79	2,87	0,62	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forlivese	914	2,88	7,20	6,66	7,95	5,07	1,44	1,09	0,31	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Garfagnana - Mugello	915	4,48	17,91	10,45	7,46	5,97	3,13	0,00	0,38	0,00	0,46	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Versilia-Chianti	916	3,73	5,97	5,22	1,49	2,24	1,79	1,34	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rimini - Ancona	917	2,93	5,92	4,48	2,99	0,00	2,68	0,45	0,76	1,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medio-Marchigiana/Abruzzese	918	2,99	15,67	10,45	4,48	0,00	0,00	1,34	0,76	0,76	0,00	0,46	0,23	0,00	0,23	0,00	0,00
Appennino Umbro	919	2,24	18,66	11,19	6,72	3,73	2,68	1,34	2,65	0,38	0,69	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Val di Chiana - Ciociaria	920	4,48	18,66	13,43	6,72	2,99	2,23	0,89	0,38	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etruria	921	5,22	11,19	7,46	5,97	5,22	1,79	1,34	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Abruzzese	923	11,94	28,36	21,64	12,69	3,73	4,02	1,79	2,27	1,52	0,46	0,69	0,00	0,00	0,23	0,23	0,00

5.1.5 Distribuzione di Gutenberg-Richter

La relazione frequenza-magnitudo o relazione di Gutenberg-Richter, è una forma funzionale che lega il tasso cumulato dei terremoti osservati con la magnitudo degli stessi:

$$\log v(M_w) = a + b (M_w - M_{w,min})$$

dove $v(M_w)$ è il tasso di eventi con magnitudo maggiore o uguale a M_w , mentre a e b sono parametri da stimare.

A partire dai tassi per classe di magnitudo riportati in Tabella 5.1 e Tabella 5.2 sono stati stimati i parametri della relazione di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica e i risultati sono mostrati in Tabella 5.3 e Tabella 5.4, rispettivamente. I tassi sono stati stimati con il metodo della massima verosimiglianza.

La tabella mostra anche i valori della magnitudo minima ($M_{w,min}$) e magnitudo massima ($M_{w,max}$) per ciascuna zona.

Tabella 5.3. Parametri distribuzione Gutenberg-Richter per zona secondo completezza storica

ZS9	a	b	$M_{w,min}$	$M_{w,max}$	$v(M_w)$
903	-0,82	-1,16	3,85	5,23	0,152
905	-0,18	-0,94	3,85	6,84	0,657
906	-0,39	-1,12	3,85	6,61	0,403
907	-0,85	-1,21	3,85	5,69	0,143
908	-0,36	-1,37	3,85	5,69	0,439
910	-0,84	-0,89	3,85	6,38	0,143
911	-0,57	-1,26	3,85	5,92	0,267
912	-0,42	-1,06	3,85	6,15	0,382
913	-0,17	-1,25	3,85	6,15	0,678
914	-0,35	-0,88	3,85	6,15	0,443
915	-0,17	-0,99	3,85	6,61	0,671
916	-0,46	-1,06	3,85	6,15	0,344
917	-0,62	-0,79	3,85	5,92	0,239
918	-0,50	-0,82	3,85	7,07	0,317
919	-0,14	-0,92	3,85	6,61	0,730
920	-0,08	-1,33	3,85	5,92	0,823
921	-0,17	-1,20	3,85	6,15	0,679
923	-0,02	-0,85	3,85	7,30	0,953

Tabella 5.4. Parametri distribuzione Gutenberg-Richter per zona secondo completezza statistica

ZS9	a	b	$M_{w,min}$	$M_{w,max}$	$v(M_w)$
903	-0,79	-1,11	3,85	5,23	0,162
905	-0,04	-0,92	3,85	6,84	0,911
906	-0,27	-1,14	3,85	5,92	0,534
907	-0,80	-1,12	3,85	5,69	0,160
908	-0,38	-1,33	3,85	5,69	0,416
910	-0,86	-0,83	3,85	6,38	0,138
911	-0,65	-1,07	3,85	5,92	0,226
912	-0,37	-1,15	3,85	6,15	0,425
913	-0,06	-1,23	3,85	6,15	0,866
914	-0,33	-0,86	3,85	6,15	0,463
915	-0,23	-0,92	3,85	6,61	0,584
916	-0,53	-0,87	3,85	5,69	0,296
917	-0,61	-0,70	3,85	5,92	0,246
918	-0,46	-0,75	3,85	7,07	0,348
919	-0,14	-0,87	3,85	6,61	0,727
920	-0,10	-1,22	3,85	5,92	0,796
921	-0,15	-1,27	3,85	6,15	0,713
923	0,01	-0,84	3,85	7,30	1,032

Per la magnitudo minima, $M_{w,min}$, si è scelto di assumere comune a tutte le zone italiane, pari a 3,85 (estremo inferiore intervallo), sebbene alcune zone mostrino tassi nulli per la prima classe di magnitudo.

La magnitudo massima, $M_{w,max}$, invece, è stata calcolata come l'estremo superiore della classe di magnitudo cui corrisponde un tasso diverso da zero in Tabella 5.1 o Tabella 5.2. È importante qui sottolineare che, le analisi di pericolosità sismica sono state comunque effettuate assumendo come magnitudo massima di ciascuna zona la massima tra quelle ottenuta da analisi del CPTI15 e quella relativa al CPTI04. Infine, in Tabella 5.3 e Tabella 5.4 sono anche riportati i tassi annui per magnitudo maggiori o uguali a $M_{w,min}$, $v(M_w)$. Tali tassi definiscono interamente il processo di Poisson omogeneo che modella l'occorrenza di eventi sismici nella zona considerata.

In Tabella 5.5 sono riportati gli errori standard (incertezze di stima) associati alla stima dei coefficienti b nei due casi di completezza considerati. Si nota come gli errori di stima per le zone di maggiore estensione, e quindi quelle che in generale contribuiscono maggiormente alla pericolosità sismica dei siti italiani, siano trascurabili; le zone più piccole presentano errori di stima leggermente superiori. Sulla base dei dati mostrati si è scelto, ai fini delle analisi probabilistiche di pericolosità sismica, di non considerare incertezza di stima sul parametro b . Tale scelta è stata operata in accordo alle indicazioni riportate in Stucchi et al 2011.

Tabella 5.5. Errori standard associati alla stima del coefficiente b per ciascuna zona

Zona	Errore standard	
	Compl, Storica	Compl, Statistica
903	0,29	0,22
905	0,03	0,04
906	0,07	0,11
907	0,20	0,19
908	0,09	0,08
910	0,05	0,04
911	0,13	0,11
912	0,08	0,09
913	0,12	0,14
914	0,06	0,06
915	0,05	0,06
916	0,07	0,08
917	0,05	0,03
918	0,04	0,04
919	0,03	0,04
920	0,08	0,06
921	0,09	0,11
923	0,02	0,02

5.2 Analisi di pericolosità sismica

5.2.1 Leggi di attenuazione

Le analisi probabilistiche di pericolosità sismica sono effettuate tenendo conto dell'incertezza di modello tramite albero logico (e.g. Lin et al 2013).

Quest'ultimo è costruito associando uguale peso (0,5) alle due stime di completezza di cui si è discusso nelle precedenti sezioni. Inoltre, si è scelto anche di utilizzare diversi modelli di propagazione del moto sismico quali:

- Bindi et al. (2011), ITA10, ricavata da registrazioni italiane;
- Bindi et al. (2014), ITA14 ricavata da registrazioni europee;
- Akkar e Bommer (2010) ricavata da registrazioni europee e del medio-oriente.

Con riferimento ai rami relativi ai modelli di attenuazione, è stato assegnato peso maggiore (0.4) alla ITA10, ricavata su dati italiani, mentre un peso pari a 0,3 è stato attribuito ai rami della AB10 e ITA 14, ricavate entrambe su dati europei e/o mediorientali.

La Figura 5.4 mostra l'albero logico implementato nelle analisi di pericolosità ed i pesi associati a ciascun ramo.

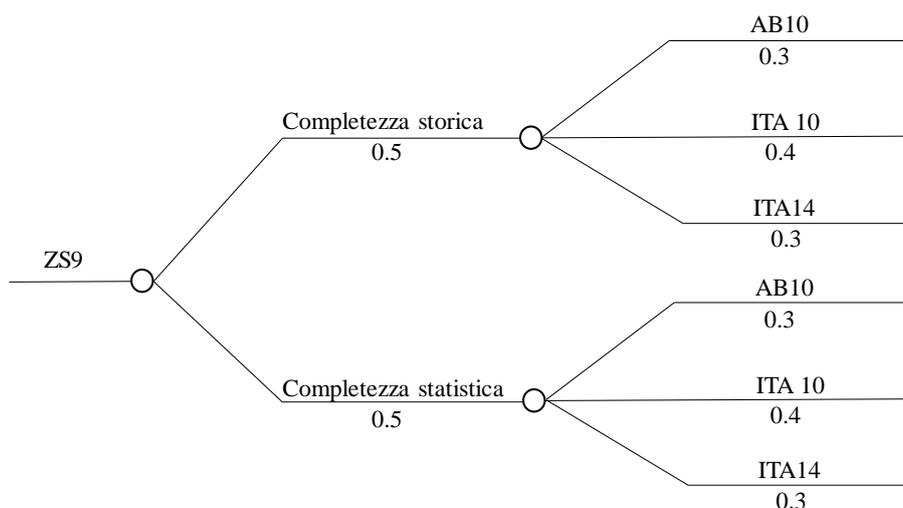


Figura 5.4. Albero logico utilizzato nelle analisi di pericolosità

Le leggi di attenuazione adottate sono state scelte tra quelle riportate nell'elenco delle Linee guida redatte dall'INGV e dalla Direzione Generale Dighe del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Gli intervalli di definizione di ciascun modello, coerenti con la sismicità dell'area, sono sintetizzati in Tabella 5.6.

Tabella 5.6. Intervalli di definizione in termini di magnitudo e distanza-sito sorgente per ciascuna legge di attenuazione selezionata

Modello di propagazione	M_w	R_{jb} [km]
Akkar e Bommer (2010)	5 - 7,6	0 - 100
Bindi et al, (2011)	4 - 6,9	0 - 200
Bindi et al, (2014)	4 - 7,6	0 - 300

Le leggi adottate hanno il vantaggio di utilizzare la stessa metrica di magnitudo, M_w , e di distanza, ovvero la minima distanza tra il sito e la proiezione in superficie della rottura, o distanza di Joyner e Boore (R_{jb}) compatibile, dopo conversione, con un modello di sorgente basato su zone sismogenetiche ad aree.

Le leggi fanno anche riferimento alla stessa misura di intensità del moto sismico ovvero la media geometrica delle componenti orizzontali degli spettri elastici di pseudo-accelerazione calcolati con smorzamento pari al 5%.

Hanno inoltre il vantaggio di essere state calibrate anche sui dati storici italiani.

I risultati presentati sono stati ottenuti tramite un software disponibile in letteratura per l'analisi probabilistica di pericolosità sismica sito-specifico OpenQuake-Engine v. 3.10.1, (Pagani et al 2014), testato e validato dal programma di ricerca PEER (Pacific Earthquake Engineering Research).

Le analisi sono state effettuate considerando suolo di classe A della norma italiana (NTC 2018).

Nelle analisi sono state simulate tutte le possibili rotture tridimensionali che possono provocare un terremoto nella zona di interesse. Questo ha richiesto la definizione di parametri descrittivi della rottura quali lo strike, il dip ed il rake (Aki & Richards 1980), il rapporto di forma della rottura (assumendo quest'ultima quadrata) e la profondità dell'ipocentro della rottura (5 km). Si è assunto nel presente caso che le rotture siano tutte di tipo diretto.

Nei calcoli, le variabili aleatorie di magnitudo e distanza sono state discretizzate con passo pari a 0,05 e 2km rispettivamente; come distanza si fa riferimento alla distanza di Joyner & Boore o R_{jb} (la distanza minima tra il sito e la proiezione in superficie del piano di faglia, Joyner e Boore 2011), ovvero la metrica assunta dalle leggi di attenuazione scelte, attraverso la relazione semi-empirica di Montaldo et al 2005.

5.2.2 Curve di pericolosità

L'obiettivo principale dell'analisi di pericolosità consiste nel determinare il numero medio di terremoti che, nell'unità di tempo (tipicamente un anno), causano il superamento al sito di una certa soglia di una misura di intensità scelta. In altri termini, l'analisi di pericolosità permette di calcolare, per una (pseudo) accelerazione spettrale, S_a , corrispondente ad un certo periodo naturale di vibrazione, T , e fattore di smorzamento, il tasso dei terremoti che causano il superamento della soglia (S_a). Tale tasso, indicato con $\lambda_{S_a(T) > s_a}$, definisce il processo di Poisson che descrive l'occorrenza dei terremoti che causano il superamento della soglia al sito di interesse nell'intervallo di tempo.

Quindi, la probabilità che il numero di terremoti che causano il superamento della soglia $N_{S_a(T) > s_a}(\Delta T)$ al sito nell'intervallo ΔT sia pari ad n è fornita dalla seguente equazione:

$$P[N_{S_a(T) > s_a}(\Delta T) = n] = \frac{(\lambda_{S_a(T) > s_a} \Delta T)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda_{S_a(T) > s_a} \Delta T}.$$

Per un sito soggetto a s sorgenti sismiche, $\lambda_{S_a(T) > s_a}$ è calcolato attraverso la seguente espressione, conosciuta come *integrale di pericolosità*.

$$\lambda_{S_a(T) > s_a} = \sum_{j=1}^{n_r} \left\{ \sum_{i=1}^s v_i \cdot \iint_{M,R} P[S_a(T) > s_a | M = m, R = r] \cdot f_{M,R,i}(m, r) \cdot dm \cdot dr \right\} \cdot p_j$$

Nell'equazione, il pedice j indica il j -esimo degli n_r rami considerati nell'analisi, il peso del quale è pari a p_j . Il pedice $i = \{1, 2, \dots, s\}$ denota la i -esima sorgente sismica, caratterizzata dal tasso dei

terremoti, v_i , con magnitudo compresa tra una magnitudo minima (m_{min}) di interesse e la massima ritenuta possibile per la sorgente (m_{max}). Il termine $f_{M,R,i}(m, r)$ rappresenta la distribuzione congiunta di magnitudo (M) e distanza sito-sorgente (R). Si noti che i termini che compaiono nell'equazione non considerano le metriche di magnitudo e distanza adottate nel presente studio avendo carattere generale.

Infine, $P[Sa(T) > sa | M = m, R = r]$ rappresenta la probabilità di superamento della soglia, condizionata ad un determinato valore di magnitudo e distanza. Tale probabilità è tipicamente calcolata attraverso una legge di attenuazione, la quale modella il logaritmo di $Sa(T)$ secondo una distribuzione normale.

$$\log(Sa) = \mu_{m,r} + \sigma \cdot \varepsilon$$

dove $\mu_{m,r}$ e $\sigma \cdot \varepsilon$ rappresentano il valore mediano e il residuo del logaritmo di $Sa(T)$, rispettivamente. In particolare, $\sigma \cdot \varepsilon$ è una variabile aleatoria normale di media nulla e deviazione standard pari a σ , mentre ε è il residuo totale standardizzato, ovvero il numero di deviazioni standard attraverso cui la generica realizzazione del logaritmo di $Sa(T)$, $\log(Sa)$, differisce da $\mu_{m,r}$. Tipicamente, il residuo è caratterizzato da due componenti, denominati residuo inter-evento, distribuito secondo una gaussiana di media nulla e deviazione standard σ_{inter} , e residuo intra-evento, distribuito secondo una gaussiana di media nulla e deviazione standard σ_{intra} . Residuo inter- e intra-evento sono due variabili aleatorie stocasticamente indipendenti. Pertanto, la deviazione standard del residuo totale, di utilizzo nelle analisi di pericolosità sito-specifico, è ottenuta come $\sigma = \sqrt{\sigma_{inter}^2 + \sigma_{intra}^2}$ (Giorgio e Iervolino, 2016).

La curva di pericolosità per la misura di intensità scelta è ottenuta per diversi valori di soglia e del tasso di superamento.

Per il presente studio le curve di pericolosità sono state calcolate per quattordici accelerazioni spettrali corrispondenti a diversi periodi naturali di vibrazione (da 0 a 2,0 s).

La scelta di tali misure di intensità è derivata da due esigenze:

- coprire un intervallo di periodi di interesse fino a 2,0 s;
- scegliere misure di intensità comuni alle leggi di attenuazione scelte per l'analisi in modo da evitare interpolazioni per periodi strutturali non comuni.

In Figura 5.5 sono rappresentate le curve di pericolosità per tutte le accelerazioni spettrali considerate, ottenute come media pesata delle curve dei singoli rami. Il tasso complessivo dei terremoti al sito in esame (ovvero il tasso in corrispondenza del valore di accelerazione nullo) è pari a 3397 eventi per anno.

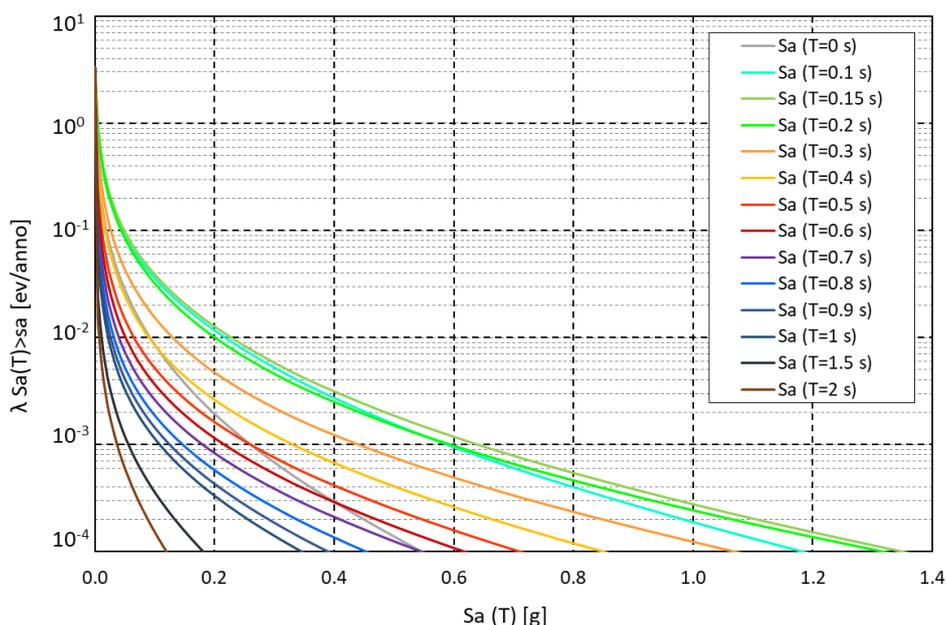


Figura 5.5. Curve di pericolosità per tutte le accelerazioni spettrali considerate nell'analisi

Le curve corrispondenti alle ordinate spettrali $Sa(T = 0s)$, $Sa(T = 0,5s)$, sono riportate in Figura 5.6 e in Figura 5.7 e in , rispettivamente. Tali ordinate spettrali sono state scelte perché considerate significative rispetto all'insieme di periodi considerati.

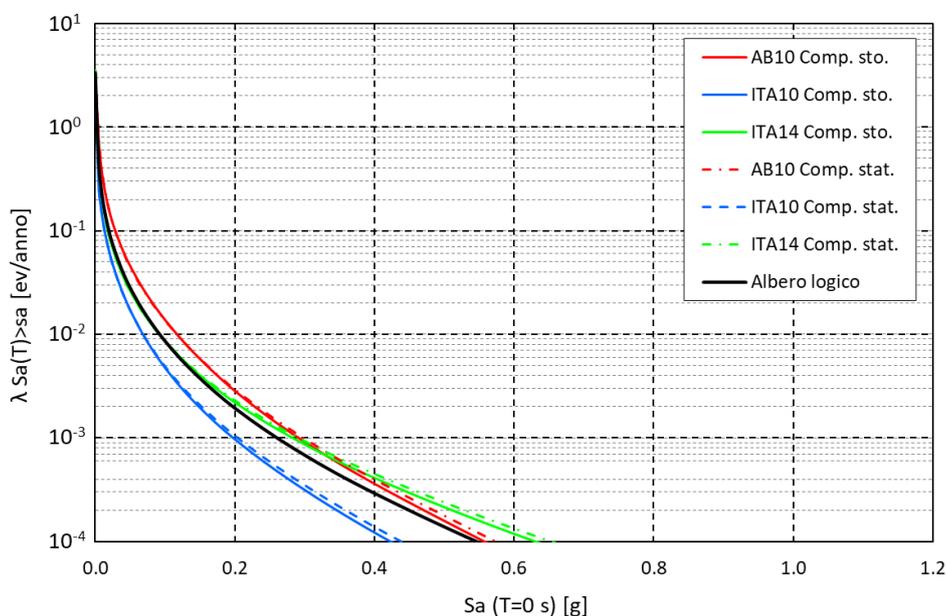


Figura 5.6. Curve di pericolosità per T = 0 secondi. In nero la curva risultata dall'albero logico. Sono inoltre rappresentate le curve costituenti i singoli rami dell'albero logico

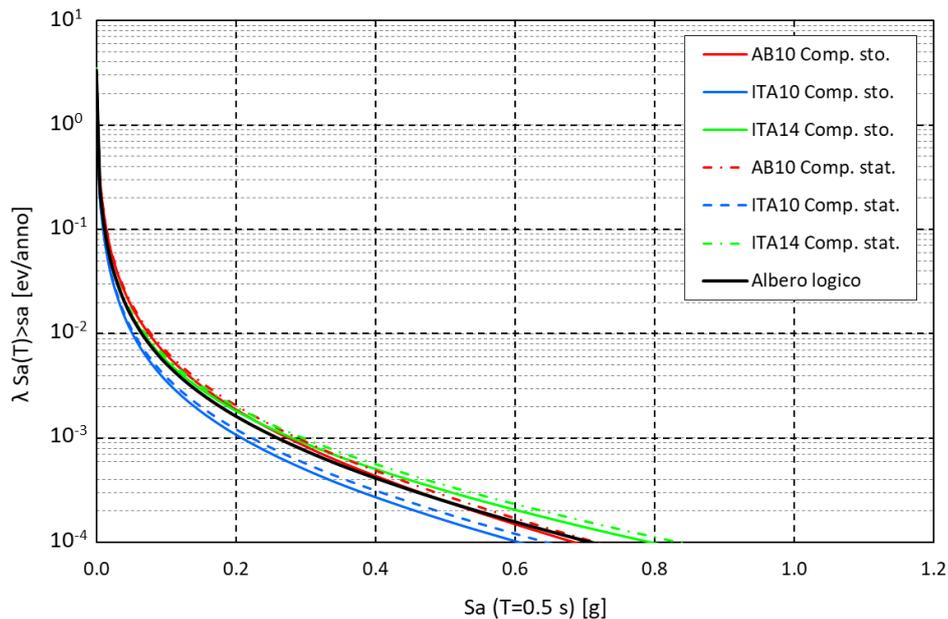


Figura 5.7. Curve di pericolosità per $T = 0,5$ secondi. Sono inoltre rappresentate le curve per i singoli rami dell'albero logico

Oltre alla curva ottenuta come media pesata dei risultati dei singoli rami (indicata in legenda con "albero logico"), sono inoltre mostrate le curve per ciascun ramo. Sebbene i risultati dei rami individuali non siano molto diversi tra loro, è possibile osservare che, come atteso, gli andamenti delle curve mostrano delle differenze imputabili ai tassi ottenuti secondo le due differenti completezze e i modelli di propagazione adottati nei calcoli. Ad esempio, appare evidente che il tasso complessivo dei terremoti al sito non è lo stesso per i singoli rami. Questo risultato è maggiormente chiaro ricordando che:

- alle diverse completezze del catalogo i corrispondono diversi parametri delle relazioni di Gutenberg-Richter e quindi anche diversi tassi per zona;
- il tasso al sito associato ad una misura di intensità pari a zero (i.e., tasso complessivo di eventi al sito) dipende anche dalla legge di attenuazione. Infatti, si è scelto di non estrapolare alcun modello oltre i propri intervalli di definizione e le tre leggi di attenuazione utilizzate hanno diversi intervalli di definizione in termini sia di magnitudo che di distanza sito-sorgente. Ad esempio, la legge ITA14 è definita per magnitudo momento compresa tra 4 e 7,6 e R_{jb} entro 300km, mentre la AB10 considera magnitudo momento tra 5 e 7,6 e distanze entro 100km dal sito. Quest'ultima quindi comporta che i terremoti minori di $M_w=5$ e/o più distanti di 100km siano trascurati. Ne consegue che, per lo stesso sito, il tasso complessivo di terremoti ottenuto tramite la prima legge sia maggiore di quello ottenuto tramite la seconda.

5.2.3 Spettri a pericolosità uniforme

Lo spettro a pericolosità uniforme (UHS Uniform Hazard Spectrum) è uno spettro le cui ordinate hanno la stessa probabilità di essere superate in un certo periodo di tempo, ovvero l'intervallo temporale che mediamente intercorre tra due superamenti consecutivi è lo stesso per tutte le ordinate. Tale intervallo temporale è detto periodo di ritorno. Fissato il periodo di ritorno, lo UHS è calcolato a partire

dalle curve di pericolosità: le accelerazioni spettrali sono ottenute infatti intercettando le curve di Figura 5.5 con la retta di ordinata pari al reciproco del periodo di ritorno scelto e leggendo i valori corrispondenti sull'asse delle ascisse.

Il periodo di ritorno, usualmente indicato con T_R , da assumere per la costruzione dello spettro dipende dallo stato limite di interesse, dalla vita nominale, V_n , e dal coefficiente d'uso, C_u , della struttura, che varia con la classe d'uso della stessa. In particolare, esso è ottenuto attraverso la seguente espressione, riportata nella Circolare alle NTC:

$$T_r = - \frac{V_n \cdot C_u}{\log(1 - P_{vr})}$$

in cui P_{vr} è fornito dalla normativa e rappresenta la probabilità di superamento da considerare per ciascuno dei sei periodi di ritorno richiesti.

Gli spettri calcolati per questi tempi di ritorno sono riportati in Figura 5.8 -fino Figura 5.13. Ciascuna figura mostra lo spettro costruito a partire dalle curve ottenute come media pesata delle curve dei singoli rami e quelli relativi ai rami individuali.

In Tabella 5.7 sono riportati, per ciascun periodo di ritorno, i valori di pseudo-accelerazione in corrispondenza dei periodi $T=0,0$ s, $T=0,5$ s, $T=1,0$ s e $T=2,0$ s.

In generale, nonostante i risultati non cambino in maniera significativa da un ramo all'altro, per periodi compresi tra 0s e 0,9s si riscontrano alcune minime differenze tra le diverse leggi di attenuazione.

Tabella 5.7. Ordinate degli UHS' ai periodi di ritorno considerati nell'analisi

Periodo di ritorno T_r [anni]	Probabilità di superamento P_{vr}	$S_a(T=0s)$ [g]	$S_a(T=0,5s)$ [g]	$S_a(T=1s)$ [g]	$S_a(T=2s)$ [g]
50	0,64	0,055	0,037	0,011	0,004
101	0,39	0,089	0,065	0,022	0,007
201	0,22	0,128	0,102	0,037	0,012
475	0,10	0,191	0,170	0,067	0,023
975	0,05	0,254	0,253	0,105	0,036
1950	0,03	0,327	0,353	0,157	0,054
2475	0,02	0,355	0,399	0,178	0,061

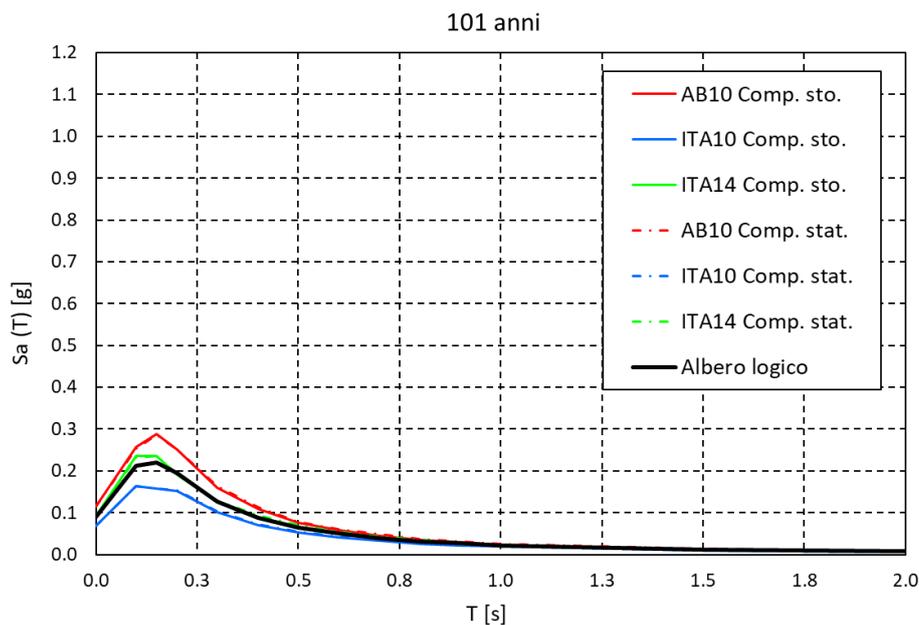


Figura 5.8. UHS con periodo di ritorno pari a 101 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

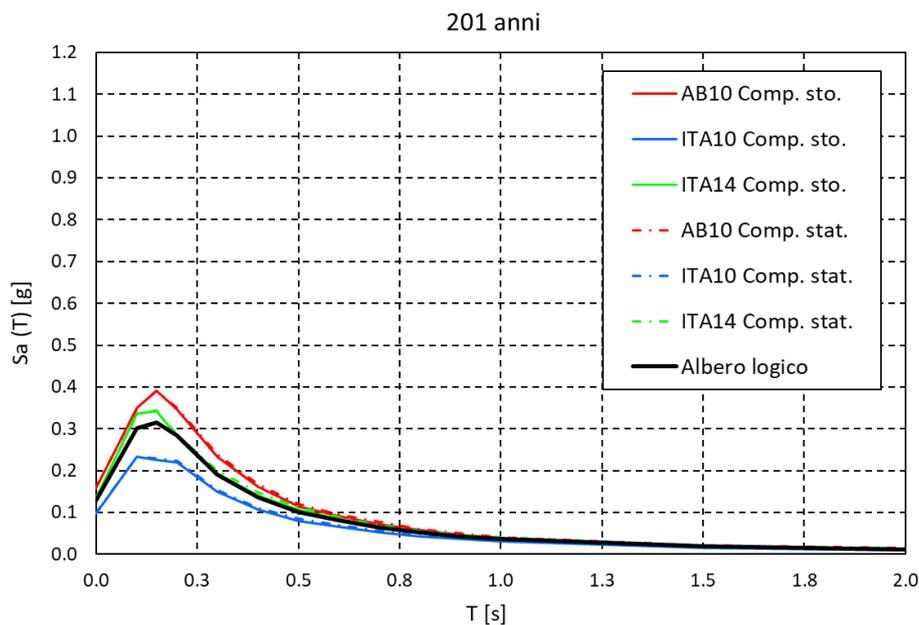


Figura 5.9. UHS con periodo di ritorno pari a 201 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

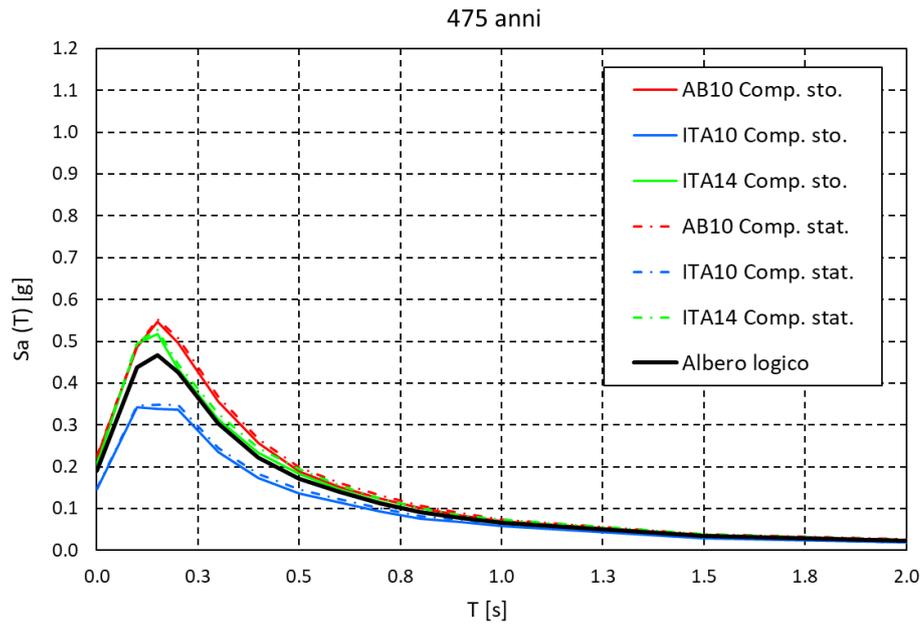


Figura 5.10. UHS con periodo di ritorno pari a 475 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

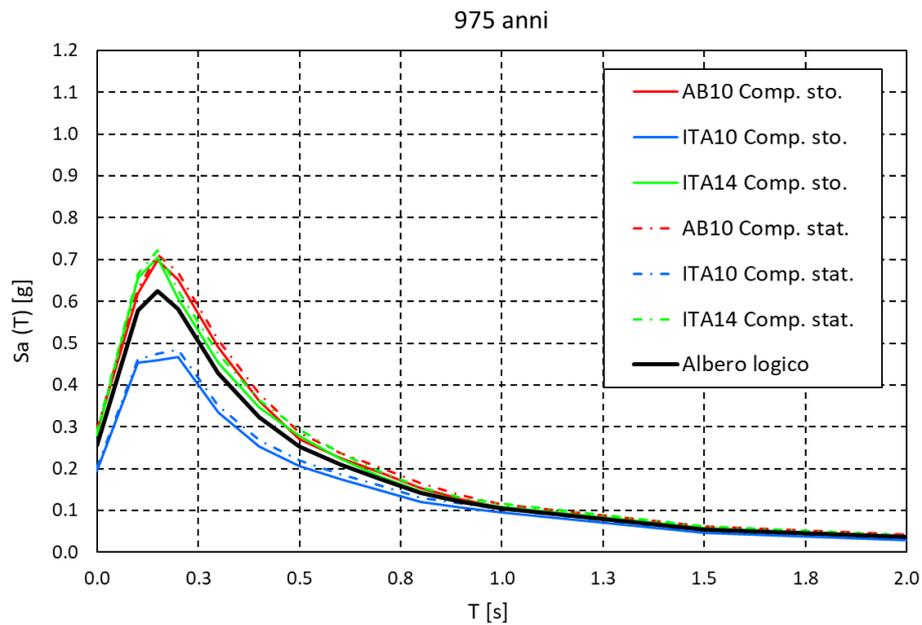


Figura 5.11. UHS con periodo di ritorno pari a 975 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

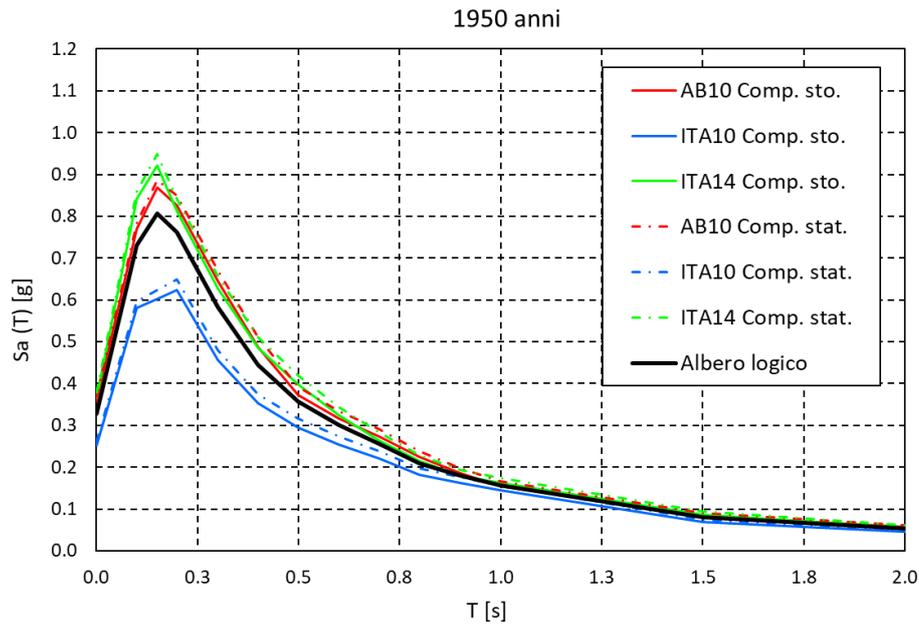


Figura 5.12. UHS con periodo di ritorno pari a 1950 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

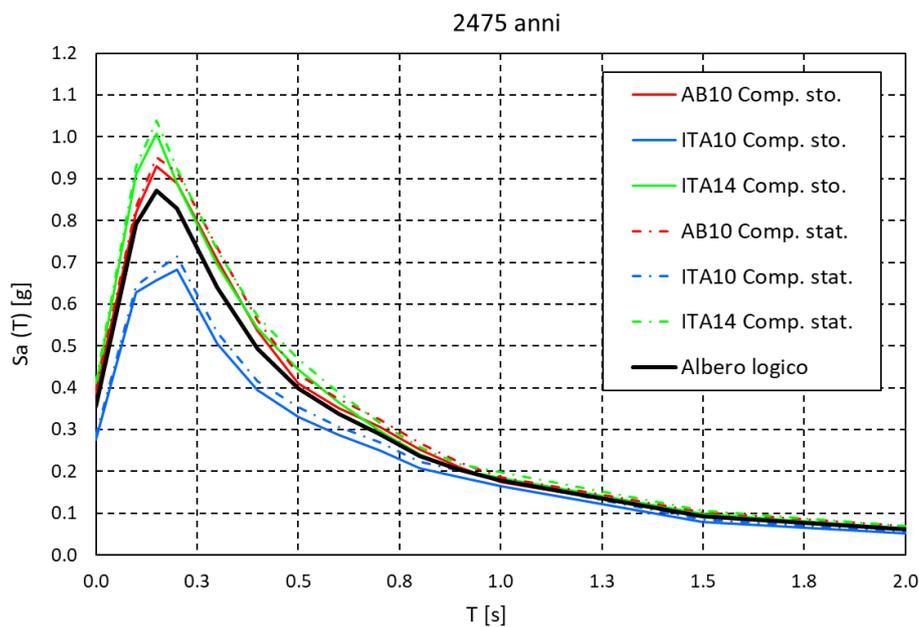


Figura 5.13. UHS con periodo di ritorno pari a 2475 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico

5.2.4 Confronto con gli spettri di norma

In questa sezione sono confrontati gli spettri UHS della sezione precedente con quelli della NTC2018 (da Figura 5.14 a Figura 5.20).

E' importante sottolineare che le leggi di attenuazione adottate in questo studio (AB10, ITA10 e ITA14) sono stimate a partire dalla media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati, in linea con le più moderne pratiche scientifiche, mentre, quelle della mappa nazionale (MPS04) sono ancora definite in massima componente.

Pertanto, per effettuare un confronto consistente, gli UHS sono stati convertiti utilizzando il valore mediano della distribuzione statistica del rapporto tra massima componente e media geometrica delle componenti orizzontali presentata in Beyer e Bommer, 2006. La dispersione di tale distribuzione è ritenuta trascurabile rispetto alla dispersione tipiche delle leggi di attenuazione.

Dal confronto emerge che:

- per tempi di ritorno $T_r = 50, 101$ e 201 anni lo spettro di norma è sempre superiore a quello UHS per ogni periodo proprio;
- per il tempo di ritorno $T_r = 475$ anni lo spettro UHS è confrontabile con quello di norma nel tratto ascendente iniziale dello spettro per mostrare un picco più elevato fino a circa $0,15$ secondi; dopo $0,15$ secondi lo spettro di norma è sempre più elevato di quello UHS;
- per tempi di ritorno più elevati ($T_r = 975, 1950$ e 2475 anni) fino a $0,20-0,25$ secondi (periodo massimo di interesse delle strutture di progetto) lo spettro UHS è ben superiore a quello proposto dalla norma;

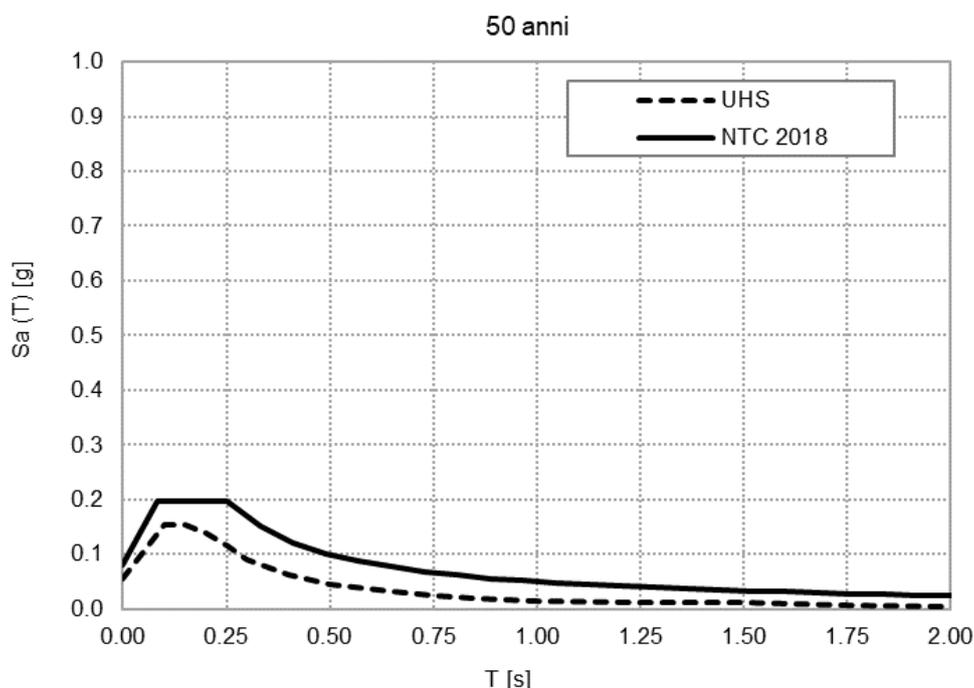


Figura 5.14. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 50 anni

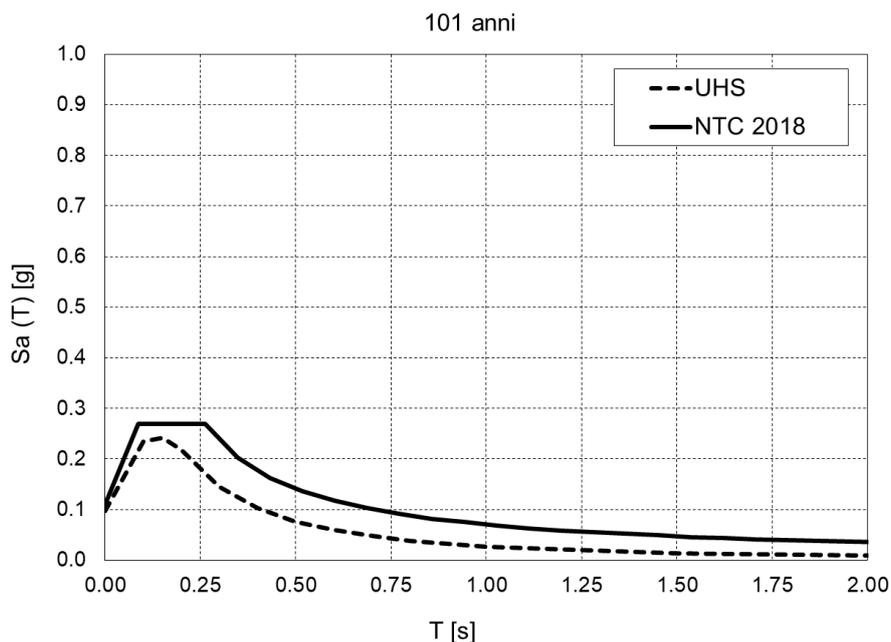


Figura 5.15. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 101 anni

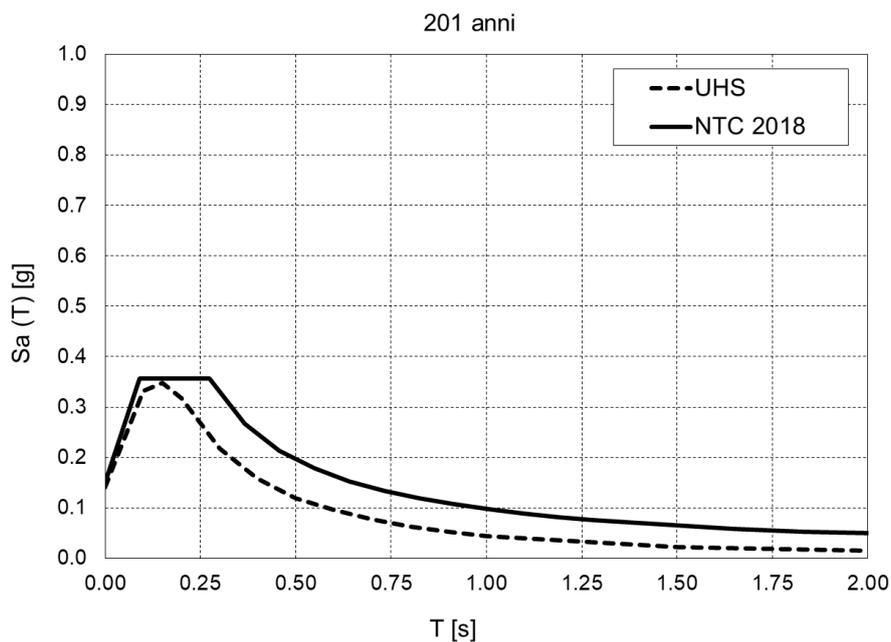


Figura 5.16. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 201 anni

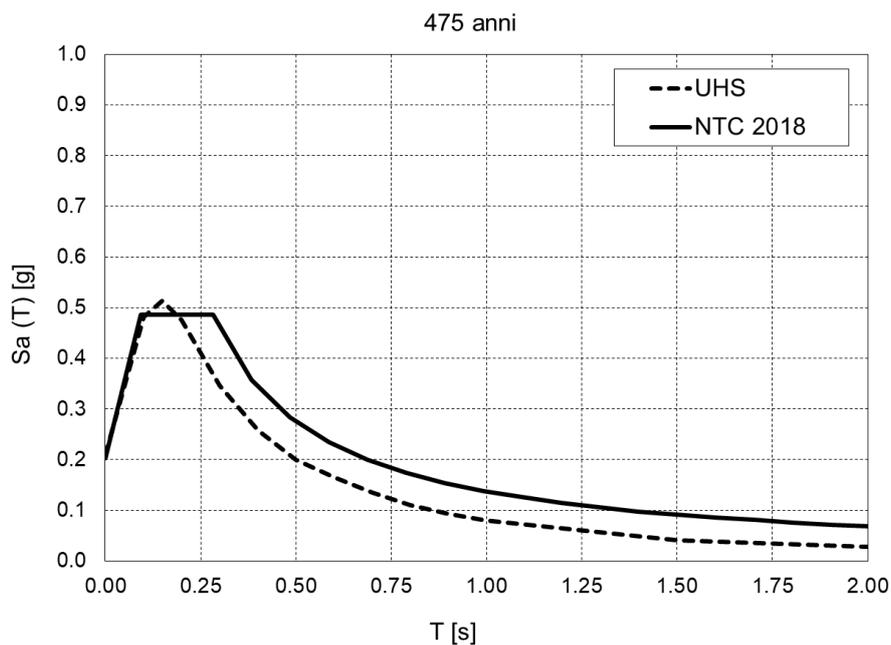


Figura 5.17. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 475 anni

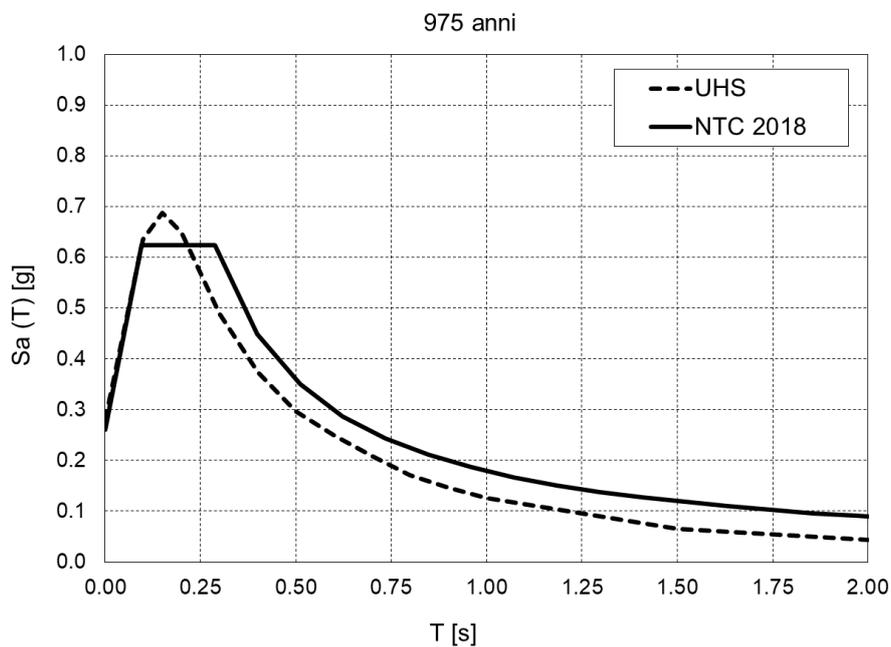


Figura 5.18. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 975 anni

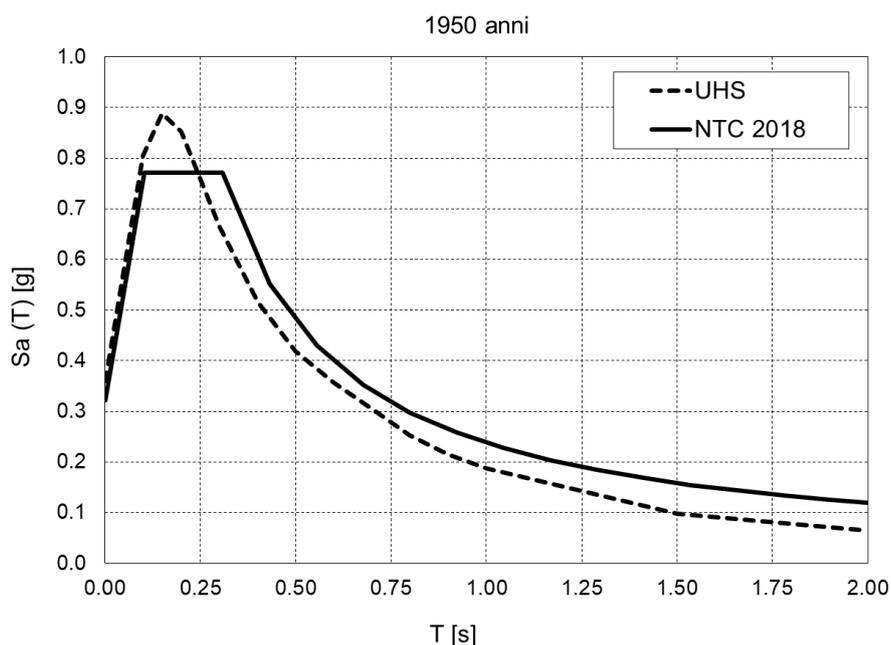


Figura 5.19. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 1950 anni

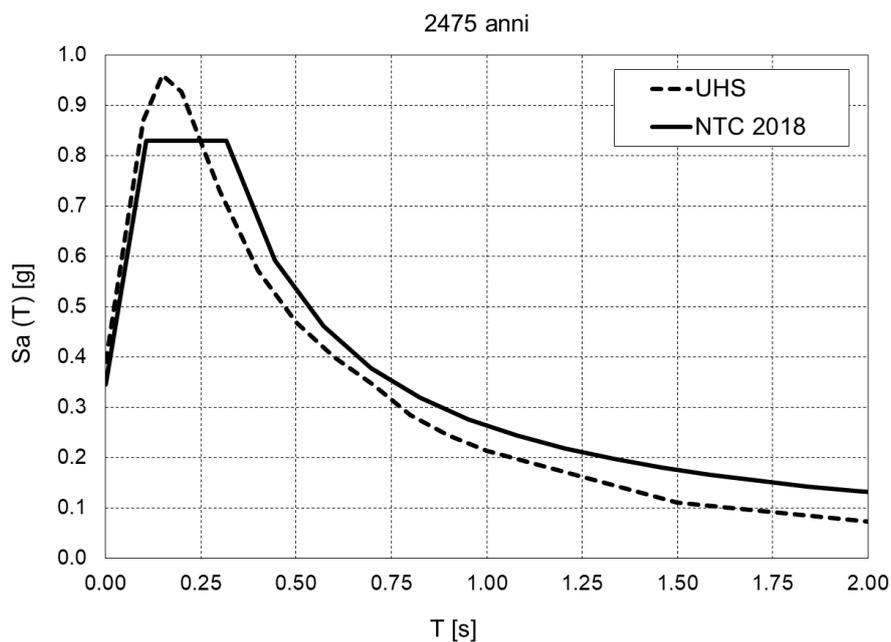


Figura 5.20. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 2475 anni

6. ANALISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA

6.1 Introduzione

I principali passi dell'analisi sono:

- 1) selezione di scenari di riferimento con definizione delle caratteristiche principali degli eventi per le sorgenti sismiche più significative;
- 2) propagazione dell'evento attraverso leggi di attenuazione.

Si precisa che l'analisi deterministica non fornisce alcuna indicazione sulla probabilità di accadimento dello scenario analizzato, né tiene in conto delle numerose incertezze in gioco.

6.2 Database di sorgenti sismogenetiche individuali DISS

Per il sito della diga di Lago Verde sono state prese in considerazione le strutture sismogenetiche catalogate dal "Database of Individual Seismogenic Sources" – DISS (DISS Working Group, 2015).

Il database DISS segnala, per la zona in esame, una faglia, sorgente sismogenetica ITIS050 – Garfagnana North (vedi par.4) che si estende a ovest della diga con una distanza minima del sito dalla proiezione in superficie del piano di faglia (Joyner e Boore, 1981) di circa 17,5 km e un valore della massima magnitudo osservata pari a 6,4 Mw (quella dell'ultimo evento associato alla faglia).

L'area presenta una elevata sismicità con magnitudo elevate (superiore a 5) a breve distanza dal sito (inferiore a 25 km).

Le caratteristiche del massimo evento generabile dalla sorgente ITIS050 sono determinate dalla massima magnitudo riportata nel catalogo ($M_{w,max} = 6,4$) e dalla minima distanza tra la faglia e il sito ($D_{min}=17,5$ km).

6.3 Leggi di attenuazione

La legge di attenuazione adottata per l'analisi deterministica è la ITA10. Questa è stimata a partire dalla media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati. Per effettuare un confronto consistente con gli spettri di norma, i risultati dell'analisi deterministica sono stati convertiti in massima componente utilizzando il valore mediano della distribuzione statistica del rapporto tra massima componente e media geometrica delle componenti orizzontali presentata in Beyer e Bommer, 2006.

6.4 Risultati dell'analisi deterministica di pericolosità sismica

I risultati dell'analisi deterministica (relativa ad ITIS050) sono stati determinati al 84esimo percentile. In Figura 6.1 è riportato lo spettro deterministico delle accelerazioni stimate al sito della diga Lago Verde.

È possibile osservare che il valore dell'accelerazione spettrale attesa è inferiore ad 1g per tutti i periodi.

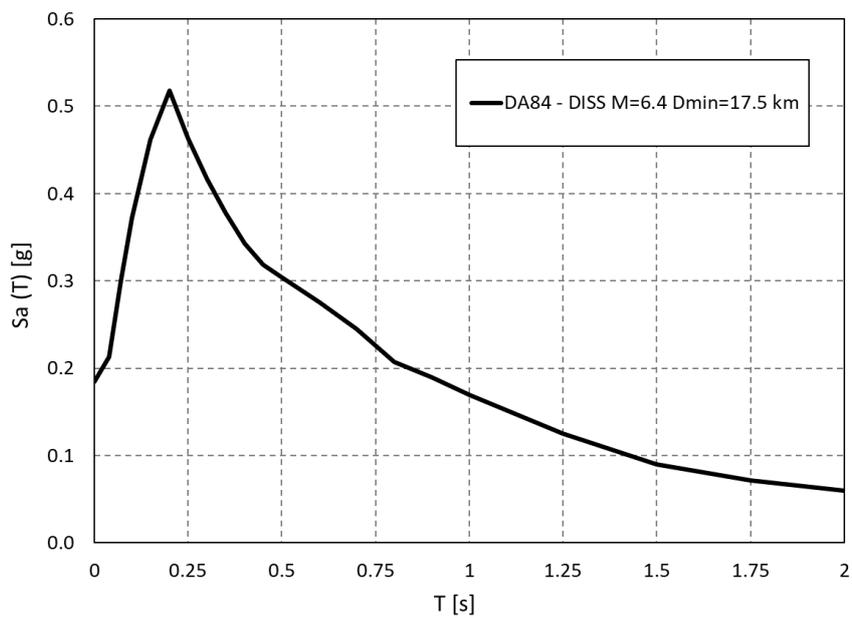


Figura 6.1. Spettro di accelerazione deterministico per la sorgente ITIS050

7. CONFRONTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI DI PERICOLOSITÀ

7.1 Dati del confronto

Nello specifico dello sbarramento di Lago Verde, viene esplicitato il confronto dei risultati delle analisi di pericolosità svolte con approccio probabilistico con il riferimento normativo e con le informazioni/risultati riportati nello studio e con analisi deterministica all'84esimo percentile.

Il confronto è stato eseguito per lo stato limite di danno, caratterizzato da un periodo di ritorno di **100 anni** e per lo stato limite di collasso, caratterizzato da un periodo di ritorno di **1946 anni**.

Per lo stato limite di danno si è ritenuto opportuno confrontare i seguenti dati:

- *uniform hazard spectrum* risultante dall'analisi di pericolosità sismica svolta con approccio probabilistico;
- spettro di normativa per il sito specifico calcolato interpolando i dati disponibili;

e a scopo qualitativo e di paragone si sono anche confrontati i risultati provenienti da:

- analisi deterministica degli eventi su base storica più significativi che hanno interessato la diga riportati nel catalogo CPTI15 (evento del 1920 con $M = 6,53$ e $D = 24,9$ km).

Per lo stato limite di collasso si è invece ritenuto opportuno confrontare i seguenti dati:

- *uniform hazard spectrum* risultante dall'analisi di pericolosità sismica svolta con approccio probabilistico;
- spettro di normativa per il sito specifico calcolato interpolando i dati disponibili;
- analisi deterministica della sorgente sismogenetica più significativa risultante dall'inquadramento sismotettonico (DISS - ITIS051-Garfagnana North, $M_w = 6,4$, $D = 17,5$ km);

e a scopo qualitativo e di paragone:

- analisi deterministica degli eventi su base storica più significativi riportati nel catalogo CPTI15 in tutto l'intervallo temporale del catalogo e nel periodo successivo alla realizzazione della diga (evento del 1920 con $M = 6,53$ e $D = 24,9$ km).

I risultati per lo stato limite di danno e per lo stato limite di collasso sono riportati nei paragrafi seguenti.

7.2 Confronto per Stato Limite di Danno

I risultati del confronto tra gli spettri di accelerazione a **componente orizzontale** per la valutazione della pericolosità sismica allo SLD sono rappresentati in Figura 7.1 e in Tabella 7.1.

Dall'analisi dei dati emerge che i risultati dell'analisi di pericolosità sismica con **approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa per ogni periodo.**

Essendo lo spettro di norma superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità con approccio probabilistico per ogni periodo, in accordo alle prescrizioni della normativa (punto C 7.7.1 delle NTD 2014), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa.**

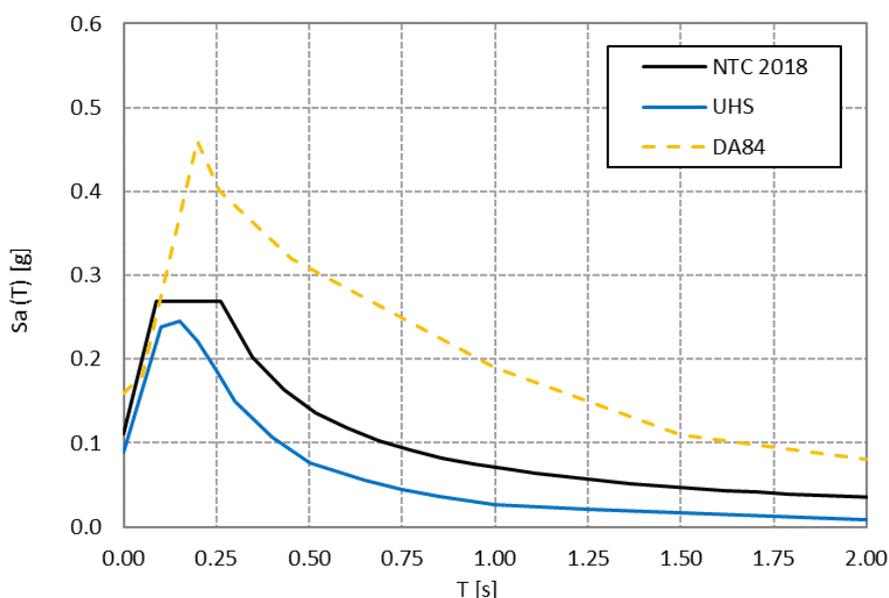


Figura 7.1. Confronto allo SLD tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.1. Confronto allo SLD tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente orizzontale

	PGA [g]	Sa (T=0,1s) [g]	Sa (T=0,2s) [g]
NTC 2018	0,111	0,268	0,268
PSHA (UHS)	0,089	0,239	0,222
DA84 diga	0,154	0,307	0,461

In analogia, per la **componente verticale**, risulta che:

- per i **periodi di interesse della diga ($T \leq 0,2$ secondi)** i risultati dell'analisi di pericolosità con **approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa;**
- per periodi superiori a 0,3 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono invece superiori allo spettro di normativa.

Essendo lo spettro di normativa superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico (analisi eseguita in questo caso solo con il modello di attenuazione ITA10 e non tramite albero logico), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa in quanto risultano più gravosi per i periodi di interesse.**

Di seguito si riporta in Figura 7.2 e Tabella 7.2 il confronto tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica allo stato limite di danno.

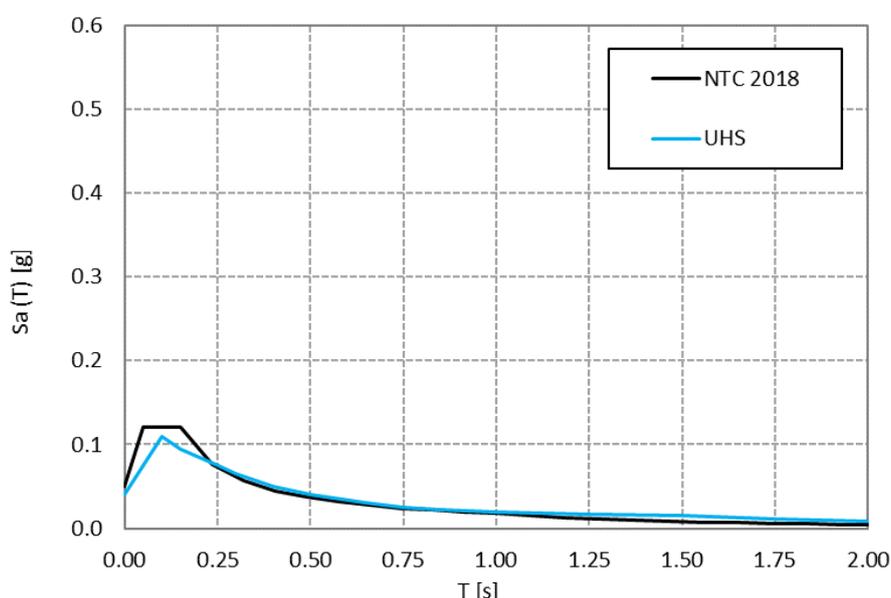


Figura 7.2. Confronto allo SLD tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.2. Confronto allo SLD tra i valori di PGA, $S_a(T=0,1\text{ s})$ e $S_a(T=0,2\text{ s})$ dei diversi scenari a componente verticale

	PGA [g]	$S_a(T=0,1\text{ s})$ [g]	$S_a(T=0,2\text{ s})$ [g]
NTC 2018	0,050	0,121	0,109
PSHA (UHS)	0,041	0,110	0,085

7.3 Confronto per Stato Limite di Collasso

I risultati del confronto tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale per la valutazione della pericolosità sismica allo SLC sono rappresentati in Figura 7.3 e in Tabella 7.3.

Dall'analisi dei dati emerge che:

- per i **periodi di interesse della diga ($T \leq 0,2$ secondi)** i risultati dell'analisi di pericolosità con **approccio probabilistico PSHA (UHS)** sono superiori allo spettro di normativa di circa il **6 - 12%** e superiori allo spettro deterministico DA84 – DISS di più dell'**50%**;
- per periodi superiori a circa 0,25 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa.

Di conseguenza, **per la componente orizzontale si adotta lo spettro di accelerazione con approccio probabilistico in quanto più gravoso per i periodi di interesse.**

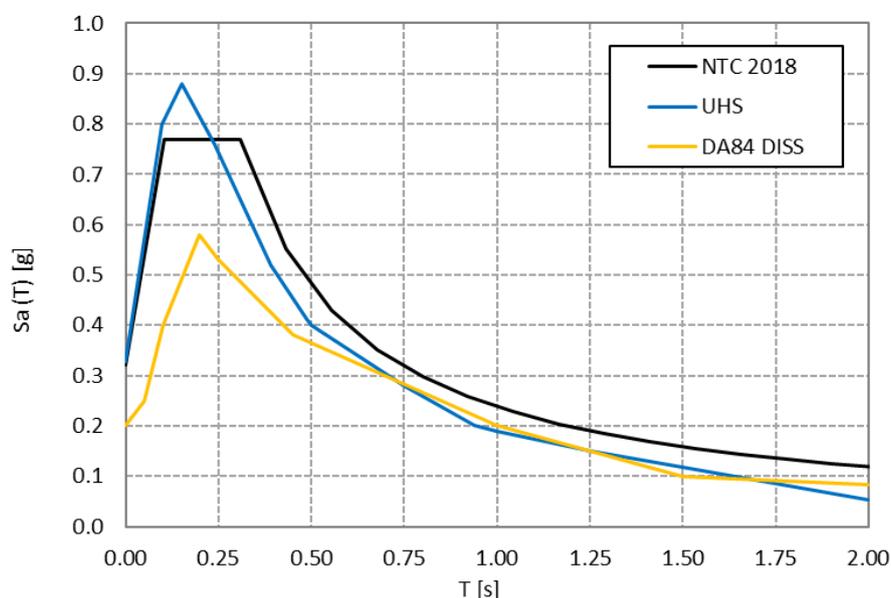


Figura 7.3. Confronto allo SLC tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.3. Confronto allo SLC tra i valori di PGA, $S_a(T=0,1s)$ e $S_a(T=0,2s)$ dei diversi scenari a componente orizzontale

	PGA [g]	$S_a(T=0,1s)$ [g]	$S_a(T=0,2s)$ [g]
NTC 2018	0,321	0,770	0,770
PSHA (UHS)	0,327	0,803	0,820
DA84 - DISS	0.206	0.415	0.585

In analogia, per la **componente verticale**, risulta che:

- per i **periodi di interesse della diga ($T \leq 0,2$ secondi)** i risultati dell'analisi di pericolosità con **approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa**;
- per periodi superiori a circa 0,4 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono invece superiori allo spettro di normativa.

Essendo lo spettro di normativa superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico (analisi eseguita in questo caso solo con il modello di attenuazione ITA10 e non tramite albero logico), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa in quanto risultano più gravosi per i periodi di interesse.**

Di seguito si riporta in Figura 7.4 e Tabella 7.4 il confronto tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica allo stato limite di collasso.

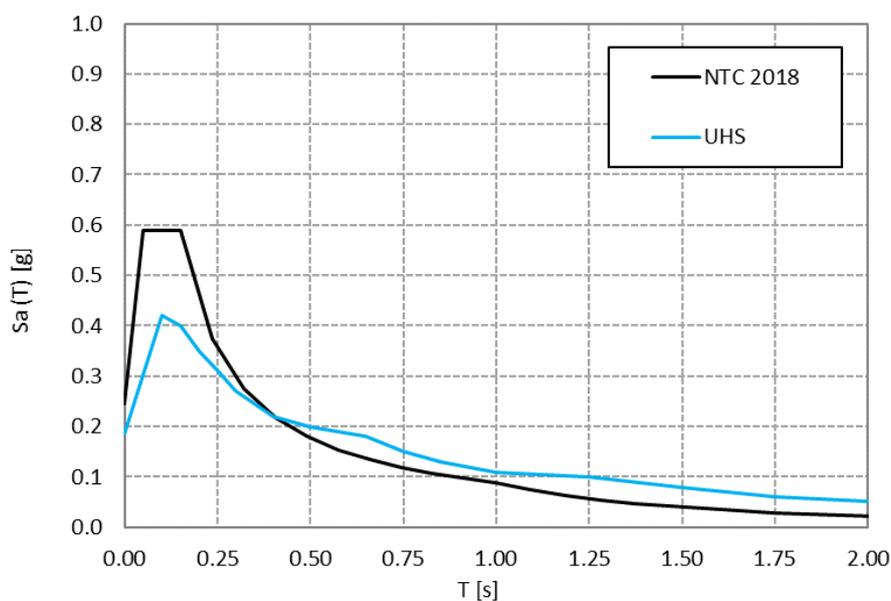


Figura 7.4. Confronto allo SLC tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.4. Confronto allo SLC tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente verticale

	PGA [g]	Sa (T=0,1s) [g]	Sa (T=0,2s) [g]
NTC 2018	0,245	0,588	0,432
PSHA (UHS)	0,185	0,420	0,350

8. CONCLUSIONI

Il presente rapporto presenta i risultati dello studio sismotettonico e dell'analisi di pericolosità sismica per il progetto definitivo **di miglioramento sismico** di recupero della diga di Lago Verde (PR).

Il sito in esame è stato dapprima oggetto di una preliminare valutazione della pericolosità sismica così come prevista dalla normativa tecnica NTC2018. Successivamente, partendo da un'analisi della macroarea in cui è inserito lo sbarramento, sono stati individuati i sismi storici e le sorgenti sismogenetiche più prossime all'impianto.

Sulla base delle sorgenti sismogenetiche sono state effettuate in parallelo due analisi di pericolosità sismica differenti: una svolta con approccio probabilistico, l'altra di tipo deterministico effettuata sulla sorgente sismogenetica più significativa.

Una volta presentate entrambe le analisi di pericolosità, è stato effettuato un confronto dei risultati con il riferimento normativo al fine di effettuare, sia per la componente orizzontale che per la componente verticale del moto sismico, la scelta degli spettri di riferimento da adottare per i differenti Stati Limite (SLD e SLC).

Nello specifico, dal confronto dei risultati dell'analisi di pericolosità sismica è emerso che, per la componente orizzontale del moto sismico allo Stato Limite di Collasso SLC (**periodo di ritorno di 1496 anni**), lo spettro di risposta calcolato con l'approccio probabilistico PSHA (UHS) è risultato superiore allo spettro previsto dalla normativa tecnica NTC 2018 e allo spettro che emerge dall'analisi deterministica (sorgente sismogenetica più significativa DISS - ITIS051-Garfagnana North, $M_w = 6,4$, $D = 17,3$ km).

Per quanto riguarda invece la componente verticale dell'accelerazione allo SLC, lo spettro da più gravoso è risultato quello previsto dalla normativa NTC 2018.

In condizioni di Stato Limite di Danno SLD (**periodo di ritorno di 100 anni**), sia a componente orizzontale che verticale, lo spettro di normativa NTC 2018 è risultato sempre superiore ai risultati dell'analisi probabilistica.

BIBLIOGRAFIA

- Aki K, Richards P. *Quantitative seismology: theory and methods*. San Francisco: 1980.
- Akkar S, Bommer JJ. *Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East*. *Seismological Research Letters* 2010; 81(2): 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
- Argnani, A., Barbacini, G. Bernini, M., Camurri, F., Ghielmi, M., Papani, G., Rizzini, F., Rogledi, S., Torelli, L., 2003. Gravity tectonics driven by Quaternary uplift in the northern Apennines: insight from the La Spezia-Reggio Emilia geotranssect. *Quaternary International*, vol. 101–102, pag.13–26.
- Barchi, M. R., De Feyter A., Magnani M. B., Minelli G., Piali G., Sotera B. M. (1998). Extensional tectonics in the Northern Apennines (Italy): Evidence from the CROP03 deep seismic reflection line. *Memorie della Società Geologica Italiana*, vol. 52, pag. 527-538.
- Bennett, R.A., Serpelloni, E., Hreinsdóttir, S., Brandon, M.T., Buble, G., Basic, T., Casale, G., Cavaliere, A., Anzidei, M., Marjonovic, M., Minelli, G., Molli, G., Montanari, A. (2012). Syn-convergent extension observed using the RETREAT GPS network, northern Apennines, Italy. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, n. B4. doi:10.1029/2011JB008744.
- Bernini M., Papani G. (2002). La distensione della fossa tettonica della Lunigiana nord-occidentale (con Carta geologica alla scala 1:50000). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, vol. 121, pag. 313-341.
- Beyer K, Bommer JJ. Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2006; **96**(4A): 1512–1522. DOI: 10.1785/0120050210.
- Bindi D, Massa M, Luzi L, Ameri G, Pacor F, Puglia R, et al. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2014; 12(1): 391–430. DOI: 10.1007/s10518-013-9525-5.
- Bindi D, Pacor F, Luzi L, Puglia R, Massa M, Ameri G, et al. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2011; 9(6): 1899–1920. DOI: 10.1007/s10518-011-9313-z.
- Boncio, P., Brozzetti, F., Lavecchia, G., 2000. Architecture and seismotectonics of a regional low-angle normal fault zone in Central Italy. *Tectonics*, vol. 19, pag. 1038-1055.
- Bonini, M., (2013). Fluid seepage variability across the external Northern Apennines (Italy): structural controls with seismotectonic and geodynamic implications. *Tectonophysics*, vol. 590, pag. 151–174.
- Carmignani, L., Decandia, F.A., Disperati, L., Fantozzi, P.L., Kligfield, R., Lazzarotto, A., Liotta, D., Meccheri, M., 2001. Inner Northern Apennines, in "Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins", a cura di G.B. Vai e I.P. Martini, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pag. 197-214.
- Carmignani, L., Kligfield, R., 1990. Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex. *Tectonics*, vol. 9, n. 6, pag. 1275-1303.
- Carmignani, L., Conti, P., Massa, G., Vaselli, L., Mancini, S. (2006). Lineamenti geologici delle Alpi Apuane. *Acta apuana, Suppl. V*, pag. 9-23.
- Cenni, N., Mantovani, E., Baldi, P., Viti, M. (2012). Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, vol. 58, pag. 62-72.

Chiarabba, C., Jovane, L., Di Stefano, R., 2005. A new view of Italian seismicity using 20 years of instrumental recordings. *Tectonophysics*, vol. 395, n. 3-4, pag. 251-268.

Chiarabba C., Palano M., 2017. Progressive migration of slab break-off along the southern Tyrrhenian plate boundary: Constraints for the present day kinematics. *Journal of Geodynamics*, vol. 105, pag. 51-61.

Circolare del ministero delle infrastrutture e dei trasporti, n.7 del 21 Gennaio 2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018. *Consiglio Superiore Dei Lavori Pubblici GU n35 Del 11022019* 2019.

Cornell CA. *ENGINEERING SEISMIC RISK ANALYSIS*. vol. 58. 1968.

Cornell CA. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1968; **58**(5): 1583–1606.

CPTI Working Group. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, version 2004 (CPTI04)*. 2004.

CS.LL.PP. Decreto Ministeriale: Norme tecniche per le costruzioni, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 42, 20 febbraio, Suppl. Ordinario n. 8. Ist. Polig. e Zecca dello Stato S.p.a., Rome (in Italian). 2018.

Devoti, R., Esposito, A., Pietrantonio, G., Pisani, A.R., Riguzzi, F., 2011. Evidence of large-scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction PToundary. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 311, n. 3-4, pag. 230-241.

DISS Working Group (2010). Version 3.1.1: a compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://www.diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

DISS Working Group (2015). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

Giorgio M, Iervolino I. On Multisite Probabilistic Seismic Hazard Analysis. DOI: 10.1785/0120150369.

Gruppo di Lavoro MS (2008). *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province autonome- Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.

Gutenberg B, Richter CF. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1944; **34**: 185–188.

Iervolino I, Chioccarelli E, Convertito V. Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2011; **31**(9): 1212–1231. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.05.001.

Iervolino I, Chioccarelli E, Giorgio M. Aftershocks' effect on structural design actions in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018; **108**(4): 2209–2220. DOI: 10.1785/0120170339.

Iervolino I, Galasso C, Cosenza E. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis 2010; **8**: 339–362. DOI: 10.1007/s10518-009-9146-1.

Iervolino I, Giorgio M, Cito P. The peak over the design threshold in strong earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2019; **17**(3): 1145–1161. DOI: 10.1007/s10518-018-0503-9.

Iervolino I, Giorgio M, Cito P. Which earthquakes are expected to exceed the design spectra? *Earthquake Spectra* 2019(In press). DOI: 10.1193/032318EQS066O.

Iervolino I, Giorgio M. E' possibile evitare il superamento delle azioni di progetto nell'area epicentrale di terremoti forti? *Progettazione Sismica* 2017; **8**: 25–32.

Iervolino I, Giorgio M, Polidoro B. Sequence-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2014; **104**(2): 1006–1012. DOI: 10.1785/0120130207.

INGV (2007). http://cnt.rm.ingv.it/~earthquake/data_id/2199802450/event.php.

ISIDe working group (2016). Version 1.0, DOI: 10.13127/ISIDe, <http://cnt.rm.ingv.it/iside>.

Joyner WB, Boore DM. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1981; **71**(6): 2011–2038.

Kottke, Albert R., and Ellen M. Rathje. (2008). "Technical manual for Strata." Report No.: 2008/10. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J

Lavoro G. Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. *Rapporto Conclusivo per Il Dipartimento Della Protezione Civile, Aprile 2004, Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Milano-Roma, Italy, Available at Http://ZonesismicheMi IngvIt/ (Last Accessed April 2019)* 2004.

Martelli, L., Santulin, M., Sani, F., Tamaro, A., Bonini, M., Rebez, A., Corti, G., Slejko, D. (2017a). Seismic hazard of the Northern Apennines based on 3D seismic sources. *Journal of Seismology*. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1.

Martelli, L., Bonini, M., Calabrese, L., Corti, G., Ercolessi, G., Molinari, F.C., Piccardi, L., Pondrelli, S., Sani, F., Severi, P. (2017b). Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, con Note illustrative. Regione Emilia-Romagna, Ed, 94.

Martini, I. P., Sagri, M. (1993). Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy. *Earth-Science Reviews*, vol. 34, n. 3, pag. 197-233.

Meletti C, D'Amico V, Martinelli F, Rovida A. *Valutazione della completezza e delle sequenze del catalogo CPTI15*. 2018.

Meletti C, Galadini F, Valensise G, Stucchi M, Basili R, Barba S, et al. A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics* 2008; **450**(1–4): 85–108. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.01.003.

Meletti C. Progetto S1: proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274/2003 e progettazione di ulteriori sviluppi. *Report Finale, Disponibile a Http://Esse1Milngv It/Data/S1_Rendicontazione_Scientifica_finale_S1Pdf (Ultimo Accesso Aprile 2018), 70 Pp* 2007.

Montaldo V, Faccioli E, Zonno G, Akinci A, Malagnini L. Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy. *Journal of Seismology* 2005; **9**: 295–316.

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, et al. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters* 2014; **85**(3): 692–702. DOI: 10.1785/0220130087.

Pondrelli, S., Salimbeni, S., Ekström, G., Morelli, A., Gasperini, P., Vannucci, G., 2006. The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 159, n. 3-4, pag. 286-303.

Rovida A, Locati M, Camassi R, Lolli B, Gasperini P, Azzaro R, et al. Italian Parametric Earthquake

Catalogue (Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani) version CPTI15 release 1.5 Macro seismic data management and revision. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI15.

Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini P. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. *Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia* 2016. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI15.

F Sabetta, A Pugliese - Bulletin of the Seismological Society of America, 1996. [Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions.](#)

Serpelloni, E., Anzidei, M., Baldi, P., Casula, G., Galvani, A. (2006). GPS measurement of active strains across the Apennines. *Annali di Geofisica.*, vol. 49, n. 1, pag. 319–329.

Stramondo, S., Vannoli, P., Cannelli, V., Polcari, M., Melini, D., Samsonov, S., Moro, M., Bignami, C., Saroli, M., 2014. X-and C-Band SAR Surface Displacement for the 2013 Lunigiana Earthquake (Northern Italy): A Breached Relay Ramp?. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, n. 7, pag. 2746-2753.

Stucchi M, Albarello D, Albini P, Camassi R, Castelli V, Meletti C, et al. *GNGTS-Atti del 23° Convegno Nazionale / 08.08 LA COMPLETEZZA DEL CATALOGO DEI TERREMOTI ITALIANI 2004 VALUTATA PER LE ZONE SISMOGENETICHE ATTRAVERSO GLI APPROCCI STORICO E STATISTICO.*

Stucchi M, Meletti C, Montaldo V, Crowley H, Calvi GM, Boschi E. Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2011; **101**(4): 1885–1911. DOI: 10.1785/0120100130.

Valensise G, Pantosti D. Introduction to Database. *Annals of Geophysics* 2001; **44**(4): 797–808.

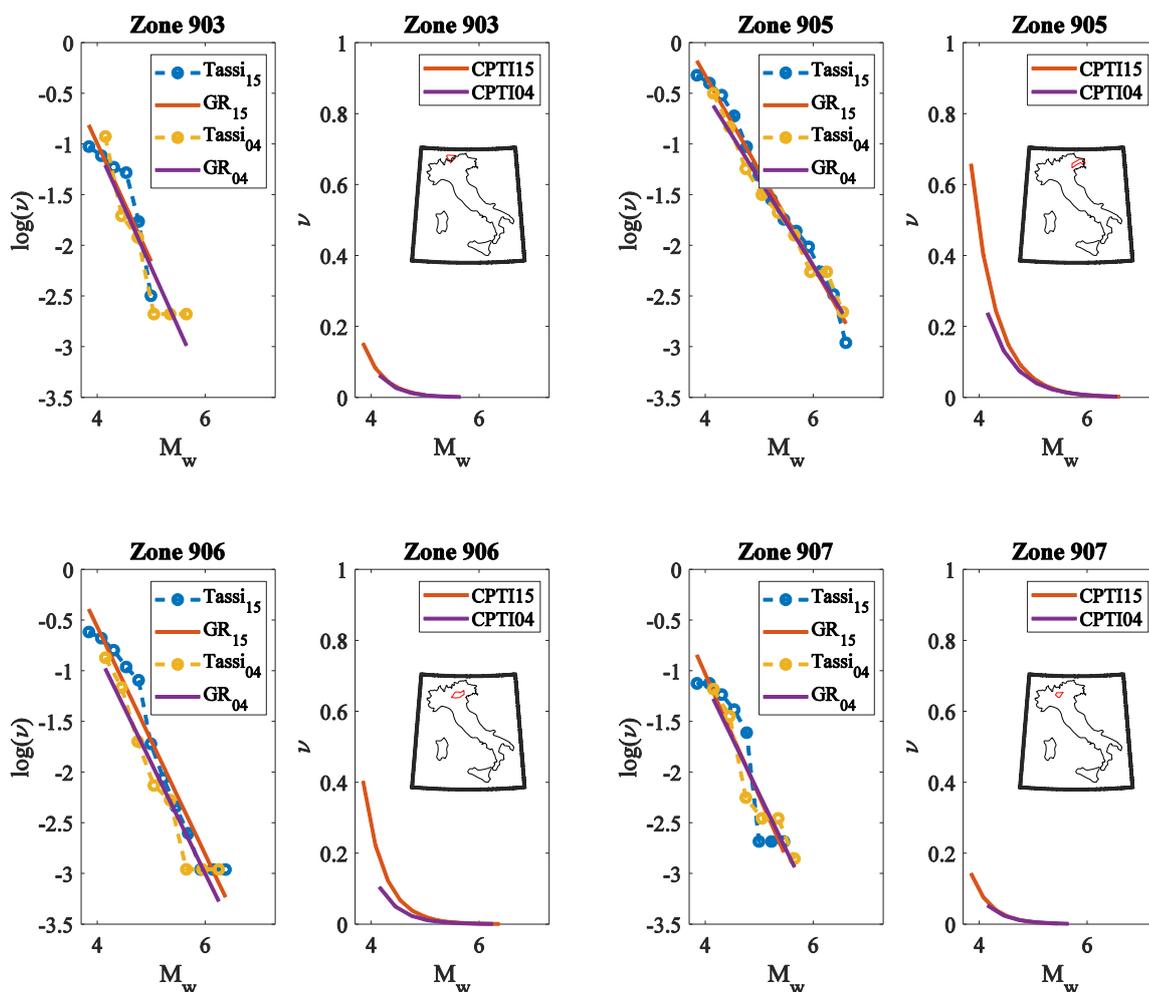
Viti, M., Mantovani, E., Babbucci, D., Tamburelli, C., Cenni, N., Baglione, M., D'Intinosante, V. (2015). Belt-parallel shortening in the Northern Apennines and seismotectonic implications. *International Journal of Geosciences*, vol. 6, pag. 938-961.

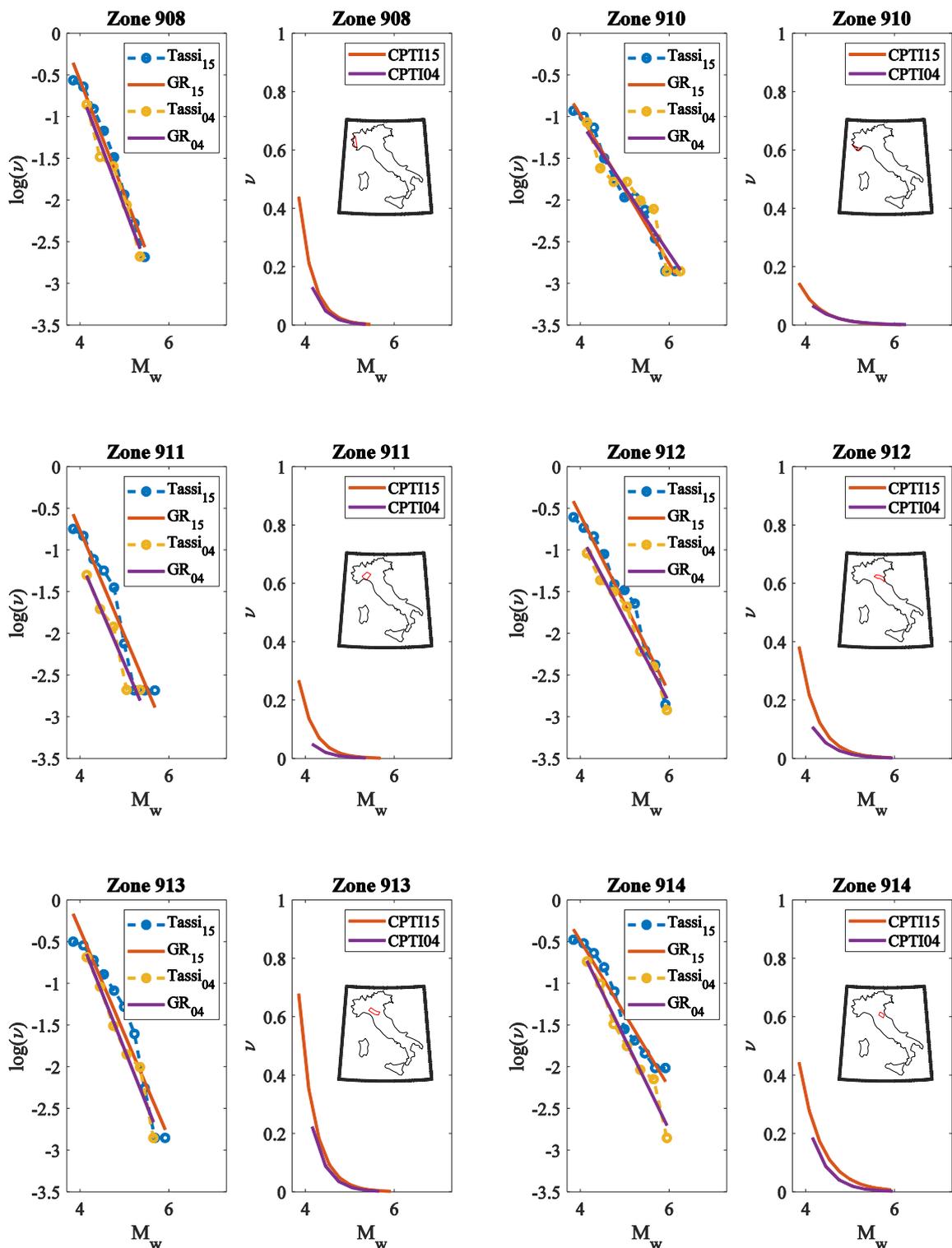
APPENDICE A

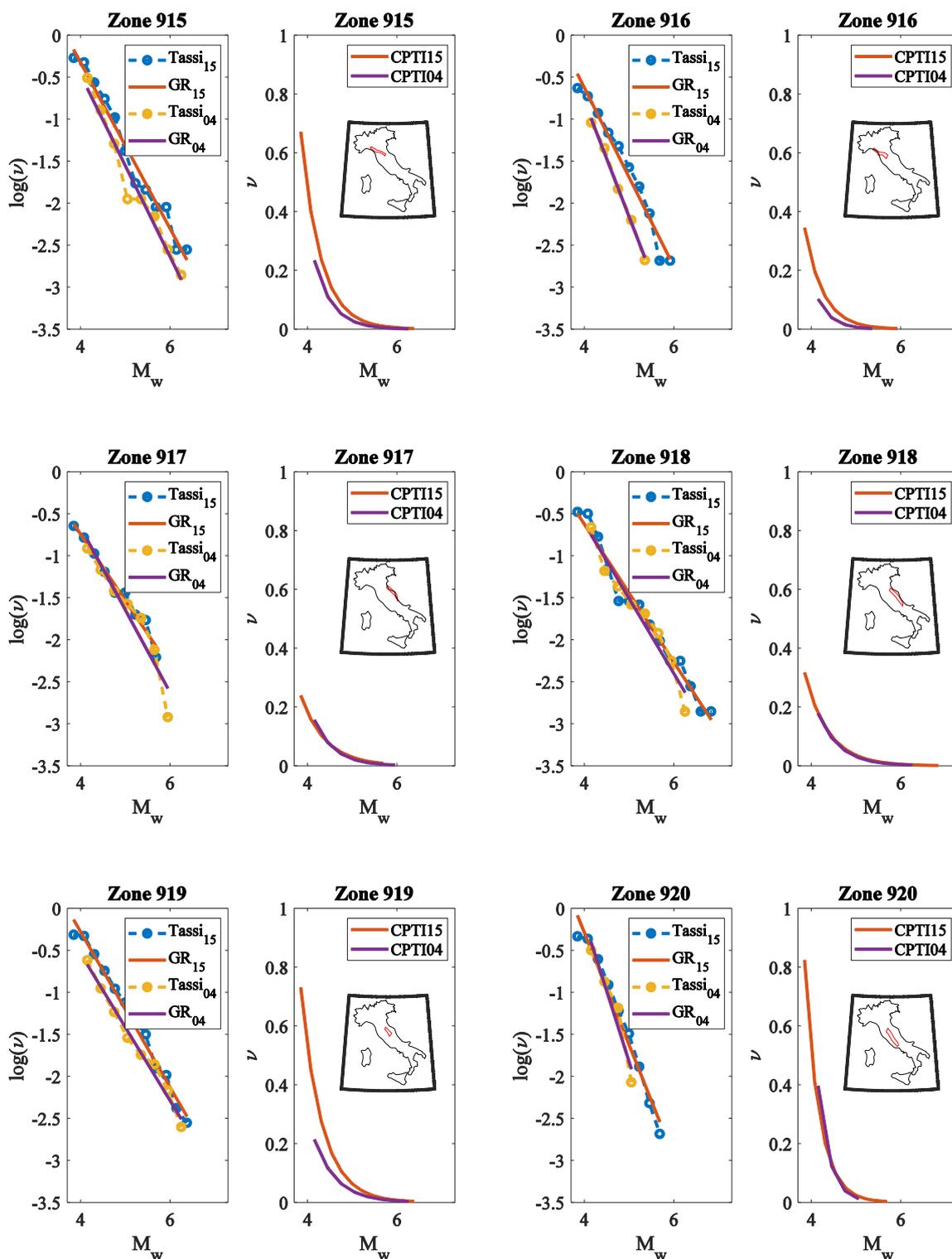
STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STORICA

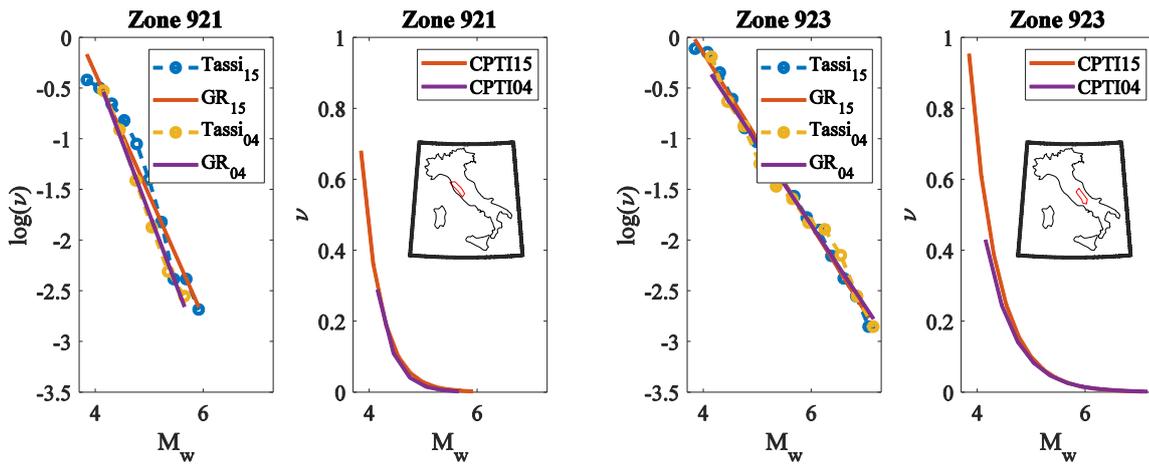
Si riportano i grafici rappresentativi delle stime dei coefficienti di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica.

Ogni figura si riferisce ad una zona ed è divisa in due pannelli. A sinistra, in scala logaritmica, sono riportati i tassi cumulati annuali per classe di magnitudo ottenuti da CPTI15 con completezza storica e da CPTI04 (Tassi₁₅ e Tassi₀₄ in legenda, rispettivamente). A tali tassi sono sovrapposte le funzioni di Gutenberg-Richter tarate su di essi (GR₁₅, GR₀₄). Le stesse funzioni sono confrontate a destra in scala lineare; nel pannello di destra è anche evidenziata la localizzazione della zona sismogenetica a cui si fa riferimento.









APPENDICE B

STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STATISTICA

Si riportano i grafici rappresentativi delle stime dei coefficienti di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica.

Le figure sono nello stesso formato già descritto per l'Appendice A.

Il calcolo riferito al CPTI15 considera la stima della completezza statistica.

Sebbene i risultati di CPTI04 qui riportati sono gli stessi del caso precedente e fanno quindi riferimento alla completezza storica, si ritiene che il confronto grafico possa comunque essere utile.

