



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 2

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Bologna



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA	Raggruppamento temporaneo di professionisti Capogruppo: dott. geol. Samuel Sangiorgi Mandante: ing. Marco Soglia	Gennaio 2020

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	4
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.1	Riferimenti bibliografici.....	7
2.2	Sismicità storica.....	7
2.3	Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	12
2.4	Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV.....	13
2.5	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	15
	2.5.1 <i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 – DGR 2193/2015 – DGR 630/2019)</i>	15
	2.5.2 <i>Il rischio sismico definito nel PTCP della Città Metropolitana di Bologna</i>	17
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	18
3.1	Inquadramento geotettonico e geologico–stratigrafico.....	18
3.2	Ulteriori dati geologici e morfo–strutturali in aree con evidenze di attività tettonica recente.....	22
3.3	Stratigrafia.....	24
	3.3.1 <i>Substrato marino</i>	24
	3.3.2 <i>Coperture quaternarie</i>	26
3.4	Idrogeologia.....	28
3.5	Cenni sulle cavità sepolte antropiche.....	30
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	32
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	35
5.1	Settore di pianura.....	35
5.2	Settore di collina.....	43
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	46
6.1	Commenti introduttivi.....	46
6.2	Valutazioni sulla liquefacibilità.....	46

6.3 Aree con cavità sepolte.....	49
6.4 Definizione del substrato rigido.....	49
7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS.....	53
7.1 Cenni introduttivi.....	53
7.2 Sintesi illustrativa delle MOPS.....	53
7.3 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	57
7.3.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali: calcolo dei fattori di amplificazione.....	58
7.3.2 Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione.....	59
7.3.3 Effetti della topografia: calcolo dei fattori di amplificazione.....	60
7.4 Elaborazione dei valori di H_{SM}	64
8 ELABORATI CARTOGRAFICI.....	65
8.1 Carta delle Indagini.....	65
8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica.....	65
8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	66
8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS.....	67
8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	70
8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2.....	70
8.7 Carta della distribuzione dei valori di H_{SM}	71
9 BIBLIOGRAFIA.....	73

1 INTRODUZIONE

1.1 Contenuti dello studio

Il Comune di Bologna ha beneficiato di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi comunali di microzonazione sismica (livello 2) e di analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018, recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 2047/2018. Lo studio di MS di livello 2 e le analisi della CLE sono stati affidati allo Studio scrivente.

Sono state dunque espletate le seguenti attività:

- raccolta dati geognostici e geofisici disponibili ed esecuzione di alcune indagini integrative;
- elaborazione dello studio di microzonazione sismica (MS) di livello 1 e di livello 2 per il territorio urbanizzato/urbanizzabile;
- elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE);
- archiviazione dei dati e adeguamento delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

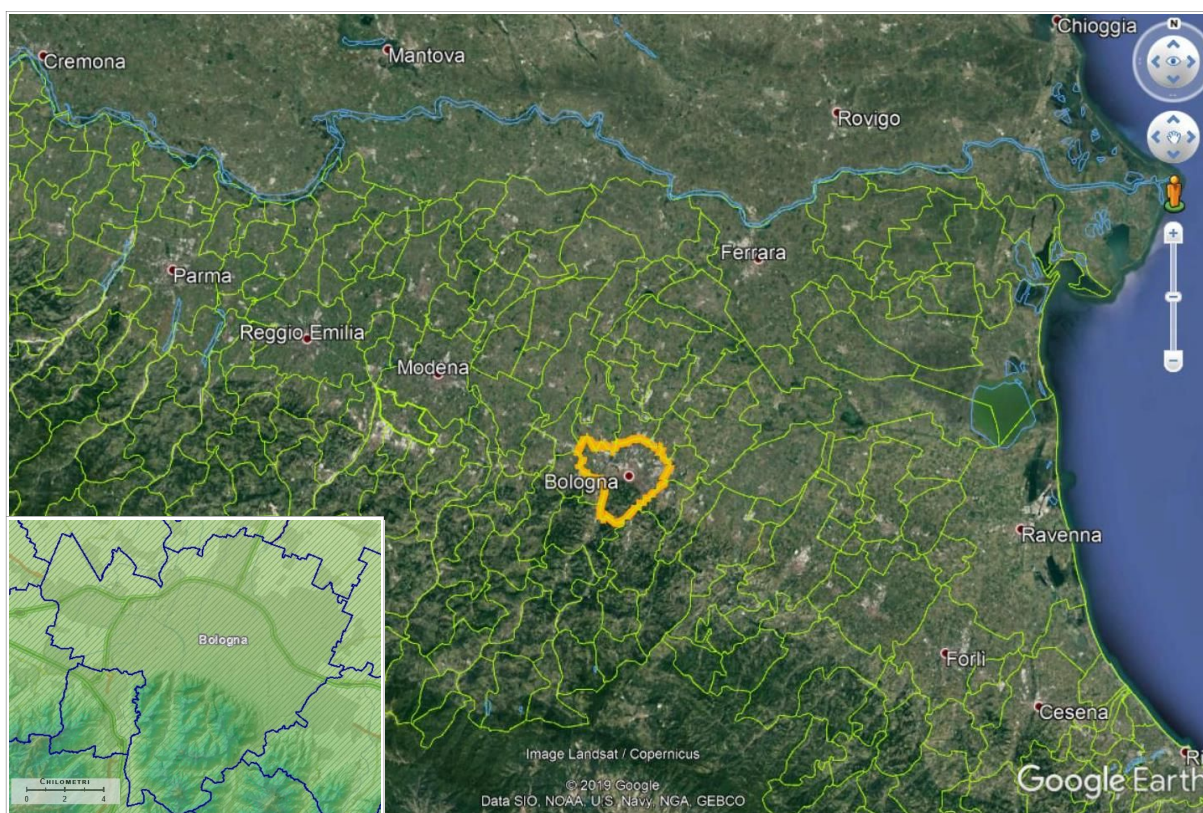


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo del Comune Bologna (foto aerea: "Google Earth")

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di Bologna: si tratta di un territorio amministrativo situato in un contesto morfologico compreso tra il margine dell'Appennino Tosco-Emiliano e la pianura Padana, di estensione areale totale pari a quasi 141 km² e con una popolazione di 390.636 abitanti (dato ISTAT 01/01/2019).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio il territorio interessato dallo studio di microzonazione sismica, che comprende tutte le aree urbane con un suo significativo intorno. Lo studio di MS è stato inoltre esteso a tutto il territorio amministrativo di pianura, in quanto interessato da un'alta densità di reti infrastrutturali.

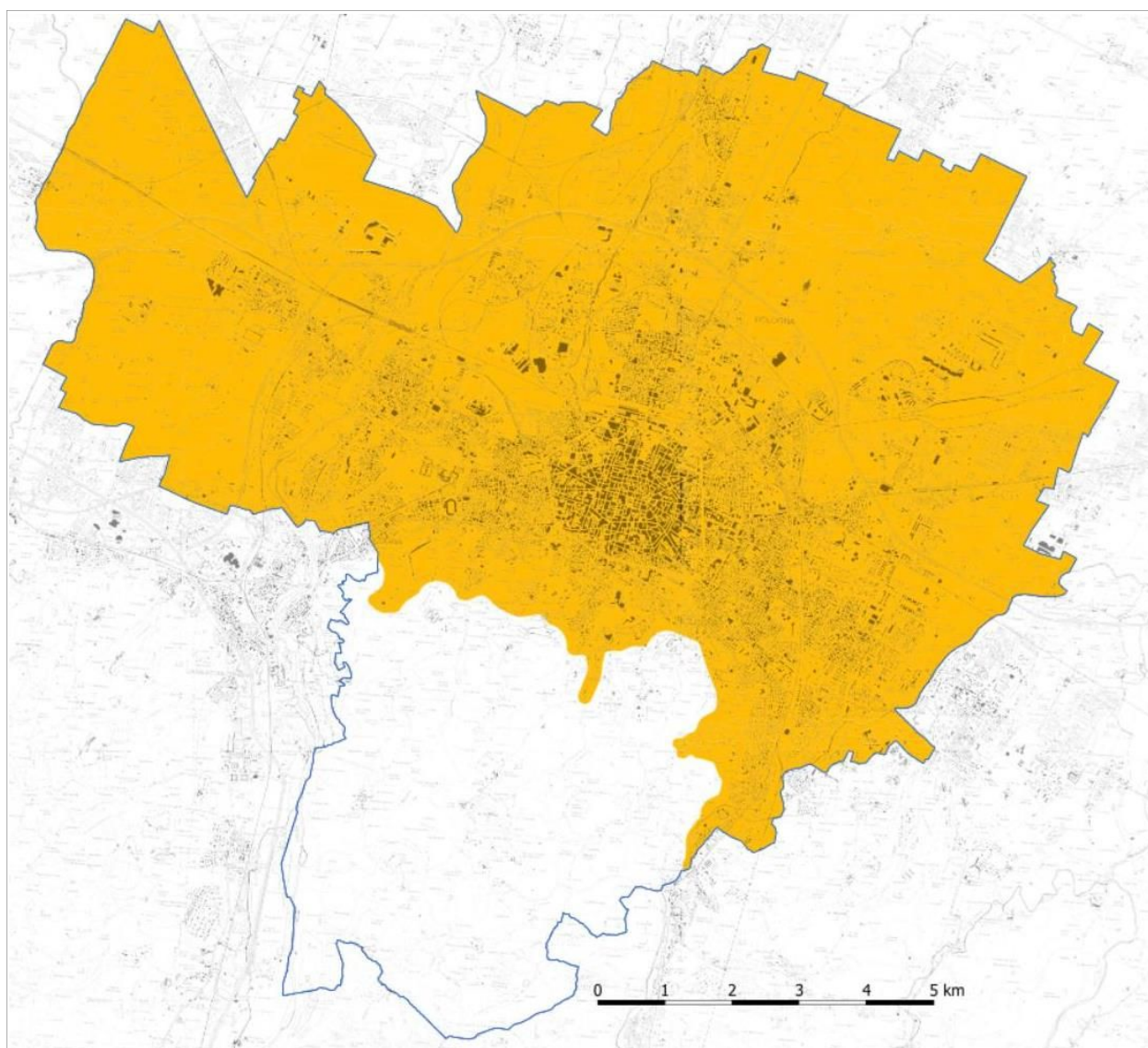


Figura 1.2 - Estensione del territorio comunale oggetto di microzonazione sismica evidenziato in giallo ocra (base topografica Regione Emilia-Romagna - CTR 1:25.000)

1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 2047/2018 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: "Criteri per la realizzazione

degli studi di microzonazione sismica e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018 e Decreto del Capo della Protezione Civile del 9 agosto 2018'.

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, novembre 2018), da qui in avanti “Standard MS 4.1”;
- ✓ “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti “ICMS”.

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 630/2019 “Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)”
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- ✓ LR 21/12/2017 n.24 “Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio”;
- ✓ DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”.

1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Bologna sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato *.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le tavole cartografiche (riprodotte in formato *.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato *.shp – shapefile);
- le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato *.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- le sezioni topografiche pubblicate per la stima degli effetti topografici per il territorio studiato (riprodotte in formato *.pdf), contenute nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1a/b/c/d	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a/b/c/d	1:10.000

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a/b/c/d	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a/b/c* Tavola 4d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavola 5a/b/c/d	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 2 - FA _{PGA}	Tavola 6a/b/c* Tavola 6d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SA1}	Tavola 7a/b/c* Tavola 7d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SA2}	Tavola 8a/b/c* Tavola 8d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SA3}	Tavola 9a/b/c* Tavola 9d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SA4}	Tavola 10a/b/c* Tavola 10d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SI1}	Tavola 11a/b/c* Tavola 11d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SI2}	Tavola 12a/b/c* Tavola 12d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA _{SI3}	Tavola 13a/b/c* Tavola 13d/e**	1:10.000 1:5.000
Carta della distribuzione dei valori di H _{SM}	Tavola 14a/b/c* Tavola 14d/e**	1:10.000 1:5.000

*Tabella 1.1 - Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Bologna
(*Riferiti al territorio comunale di pianura; ** Riferiti al territorio comunale di collina)*

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS v.4.1 (CTMS, 2018), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Sono inoltre coerenti con la successiva DGR 630/2019. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000), aggiornati al 2013. Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS_1984_UTM_Zone_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS v.4.1 (CTMS, 2018).

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015* (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse nella finestra temporale 1000–2014
- il *DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il *CFT15Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2018), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo (a_g) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.1* (DISS Working Group, 2018), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore.

2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta per il Capoluogo 204 eventi sismici (figura 2.1), di cui 106 con effetti macrosismici più significativi per i manufatti esistenti (Intensità ≥ 4) ed elencati

nella seguente tabella 2.1. La figura 2.2 riporta invece la localizzazione epicentrale degli eventi sismici più significativi segnalati nel bolognese (CPTI15 v.2.0).

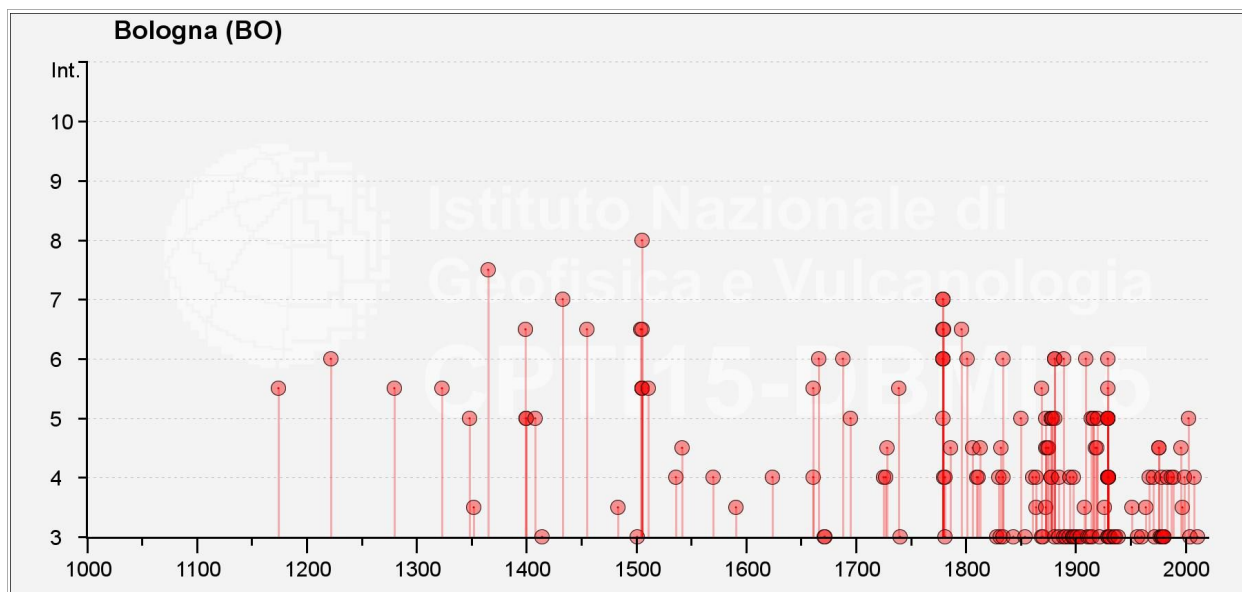


Figura 2.1- Grafico rappresentativo dei terremoti significativi per il Bologna e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
5-6	1174 08 17 18	Val Padana	3	4-5	3,93
6	1222 12 25 12 30	Bresciano-Veronese	18	7-8	5,68
5-6	1280 01 25	Pianura emiliana	2	5-6	4,4
5-6	1323 02 25 19	Bologna	2	5	4,16
5	1348 01 25	Alpi Giulie	89	9	6,63
7-8	1365 07 25 18	Bologna	1	7-8	5,33
6-7	1399 07 20 23	Appennino modenese	6	7	5,1
5	1400 02 29 19 15	Bologna	1	5	4,16
5	1400 03 03 12 15	Bologna	1	5	4,16
5	1408 01 03 16 30	Bologna	2	4	3,7
7	1433 05 04 08 05	Bologna	4	6	4,63
6-7	1455 12 20 20 45	Appennino bolognese	5	5-6	4,4
6-7	1504 12 31 04	Bolognese	15	6	5,02
8	1505 01 03 02	Bolognese	31	8	5,62
6-7	1505 01 20 23 50	Bolognese	11	5-6	4,76
5-6	1505 01 27 02 40	Bolognese	2	5	4,16
5-6	1505 04 03 12 25	Bolognese	1	5-6	4,4
5-6	1505 05 15	Bolognese	1	5-6	4,4
5-6	1511 03 26 15 30	Friuli-Slovenia	120	9	6,32
4	1536 08 17 00 05	Appennino settentrionale	10	6-7	5,12
4-5	1542 06 13 02 15	Mugello	46	9	6,02

Tabella 2.1- Terremoti significativi per Bologna con macrointensità stimata ≥ 4 (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
4	1570 11 17 19 10	Ferrarese	58	7-8	5,44
4	1624 03 19	Argenta	18	7-8	5,43
4	1661 03 21 23	Modenese	4	6-7	4,86
5-6	1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	79	9	6,05
6	1666 04 14 18 58	Bolognese	3	5	4,16
6	1688 04 11 12 20	Romagna	39	8-9	5,84
5	1695 02 25 05 30	Asolano	107	10	6,4
4	1725 10 29 17 40	Appennino tosco-emiliano	28	8	5,67
4	1727 03 09 11	Mugello	6	6-7	4,93
4-5	1728 02 04 03	Bolognese	2	5-6	4,4
5-6	1739 07 31 11	Bologna	1	5-6	4,4
6	1779 06 01 23 55	Bolognese	8		
6	1779 06 02 07 30	Bolognese	3		
7	1779 06 04 07	Bolognese	12	7	5,22
6-7	1779 06 10 08 35	Bolognese	10		
7	1779 07 14 19 30	Bolognese	17		
5	1779 08 20 10 50	Bolognese	2	5	4,16
6	1779 11 23 18 30	Bolognese	14	5	4,7
6-7	1780 02 06 04	Bolognese	9	6-7	5,06
4	1780 09 22 13 45	Forlivese	3	4-5	3,93
4	1781 04 04 21 20	Faentino	96	9-10	6,12
4-5	1786 12 25 01	Riminese	90	8	5,66
6-7	1796 10 22 04	Emilia orientale	27	7	5,45
6	1801 10 08 07 52 53.00	Bolognese	6	6	4,9
4-5	1806 02 12	Reggiano	28	7	5,21
4	1810 12 25 00 45	Pianura emiliana	33	6	5,06
4	1811 07 15 22 44	Modenese-Reggiano	19	6-7	5,13
4-5	1813 09 21 07 45	Romagna	12	7	5,28
4	1830 01 26 04 30	Alto Reno	11	5	4,53
4-5	1832 03 13 03 30	Reggiano	97	7-8	5,51
4	1834 02 14 13 15	Val di Taro-Lunigiana	112	9	5,96
6	1834 10 04 19	Bolognese	12	6	4,71
5	1850 09 18 06 20	Modenese	7	5	4,16
4	1861 10 16	Romagna	10	6-7	5,13
4	1864 12 11 17 40	Mugello	9	7	5,11
5-6	1869 06 25 13 58	Appennino bolognese	18	7-8	5,43
5	1873 06 29 03 58	Alpago Cansiglio	197	9-10	6,29
4-5	1873 09 17	Appennino tosco-ligure	64	6-7	5,26
4-5	1874 10 07	Imolese	60	7	4,96
4-5	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5,74
5	1878 03 12 21 36	Bolognese	31	6	4,84
5	1878 04 05 09 46	Bolognese	6	6	4,63
4	1878 06 04 14 40	Bolognese	13	5	4,52
4	1878 11 09 17 48 50.00	Tossignano	8	5	4,53
5	1879 04 27 04 06	Appennino tosco-emiliano	20	7	5,03
6	1881 01 24 16 14	Bolognese	38	7	5,22
5	1881 01 25 07 06	Bolognese	18	5	4,59
6	1881 02 14 09 00 30.00	Appennino bolognese	21	6	4,77

Tabella 2.1 (segue)- Terremoti significativi per Bologna con macrointensità stimata ≥ 4 (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
4	1885 02 26 20 48	Pianura Padana	78	6	5,01
6	1889 03 08 02 57 04.00	Bolognese	38	5	4,53
4	1895 05 18 19 55 12.00	Fiorentino	401	8	5,5
4	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5,37
6	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5,36
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5,63
5	1916 05 17 12 50	Riminense	132	8	5,82
5	1916 08 16 07 06 14.00	Riminense	257	8	5,82
4-5	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	187	9	5,96
4-5	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6,38
5	1920 09 07 05 55 40.00	Garfagnana	750	10	6,53
6	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6	5,05
4	1929 04 11 00 56	Bolognese	10	4	4,72
4	1929 04 12 00 32	Bolognese	7	4	4,82
5-6	1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7	5,13
4	1929 04 19 22 40	Bolognese	12	5-6	4,54
5	1929 04 20 01 10	Bolognese	109	7	5,36
5	1929 04 22 08 26	Bolognese	41	6-7	5,1
5	1929 04 22 14 19	Bolognese	12	5-6	4,61
5	1929 04 28 19 40	Bolognese	20	6	4,73
5	1929 04 29 18 36	Bolognese	45	6	5,2
4	1929 05 01 21 13	Imolese	3	4	4,57
5	1929 05 11 19 23	Bolognese	64	6-7	5,29
4	1930 10 24 00 52	Appennino tosco-emiliano	12	4	3,97
4	1930 10 26 07 14	Appennino tosco-emiliano	14	4	4,21
4	1967 12 30 04 19	Emilia Romagna orientale	40	6	5,05
4	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	228	8	5,51
4-5	1976 05 06 20	Friuli	770	9-10	6,45
4-5	1976 09 15 09 21 19.01	Friuli	54	8-9	5,95
4	1978 12 05 15 39 04.00	Romagna	34	4-5	4,61
4	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5,04
4	1987 05 02 20 43 53.32	Reggiano	802	6	4,71
4	1989 09 13 21 54 01.50	Prealpi Vicentine	779	6-7	4,85
4-5	1996 10 15 09 55 59.95	Pianura emiliana	135	7	5,38
4	1999 07 07 17 16 12.59	Frignano	32	5	4,67
5	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	133	6	5,24
4	2008 12 23 15 24 21.77	Parmense	291	6-7	5,36

Tabella 2.1 (segue)- Terremoti significativi per Bologna con macrointensità stimata ≥ 4 (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Si possono tuttavia citare ulteriori informazioni, e in particolare il terremoto più forte e più prossimo all'area in esame, secondo quanto riportato nel CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018), risulta essere quello del 3 gennaio 1505, il secondo di una sequenza con 3 scosse principali, con intensità epicentrale valutata del grado VIII della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.6 e con effetti nel bolognese compresi tra i gradi VII e VIII della scala MCS. Per la sequenza sismica del 1504-1505, il catalogo CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) riporta la seguente sintesi degli effetti principali:

Questa sequenza sismica cominciò il 31 dicembre 1504 e si protrasse per quasi cinque mesi, fino a

oltre la metà di maggio 1505. Interessò soprattutto Bologna e la vicina area pedeappenninica dove i danni furono rilevanti.

Le scosse più forti furono tre: la prima avvenne il 31 dicembre 1504 alle ore 4:00 GMT circa (le 11 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna la scossa fece cadere numerosi comignoli e causò lesioni nelle volte di vari edifici, fra cui la chiesa di S.Francesco; la chiesa di S.Giacomo subì danni anche alla facciata. A Modena fu molto forte e fece cadere qualche comignolo.

La scossa più forte della sequenza avvenne il 3 gennaio 1505 alle ore 2:00 GMT circa (le 9 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna ci furono gravi danni alle abitazioni e agli edifici pubblici, civili e religiosi. Le case crollate totalmente furono poche, ma molte abitazioni subirono danni diffusi. La parte dell'area urbana più colpita fu quella verso la pianura, compresa tra porta S.Donato e porta S.Isaia. Risultarono danneggiati soprattutto gli edifici "a volta" (come le chiese e i palazzi), e la parte più alta di numerose torri, tanto che alcune dovettero essere abbattute o abbassate per evitarne il crollo sugli edifici vicini. Nel palazzo Bentivoglio, uno dei più danneggiati, crollarono la facciata, la sala grande, cinque volte del portico e il "torresino" della vicina torre collegata al palazzo; varie stanze risultarono inoltre lesionate e tutto l'edificio sconnesso e indebolito. Più in ombra, dal punto di vista degli effetti, rimane l'area extraurbana, a cui le fonti dedicano scarsa attenzione: a Confortino, Bentivoglio e Rigosa subirono gravi danni gli edifici di proprietà della famiglia Bentivoglio; a San Lorenzo in Collina e Zola Predosa il terremoto causò lesioni nelle case e il crollo di colombaie. Ci furono danni leggeri a Ferrara, Modena, Reggio nell'Emilia. La scossa fu sentita a Firenze, Forlì, Venezia, Verona, Vicenza, e in molte altre località.

Un'altra scossa molto forte avvenne il 20 gennaio, alle ore 23:50 GMT circa (le 7 della notte in orario "all'italiana"). A Bologna si aggravarono i danni alle volte di alcuni edifici, fra cui la cattedrale di S.Pietro, le chiese di S.Petronio e S.Martino, la torre del palazzo del Podestà e l'ospedale di S.Maria della Vita. Questa scossa fu sentita in un'area estesa da Forlì e Faenza, a Venezia e Verona.

In generale, per uno studio approfondito degli effetti degli eventi sismici nel territorio bolognese è opportuno riferirsi al volume I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo (Boschi e Guidoboni, 2003), dal cui studio sono stati in seguito sintetizzati i dati del CFTI5Med.

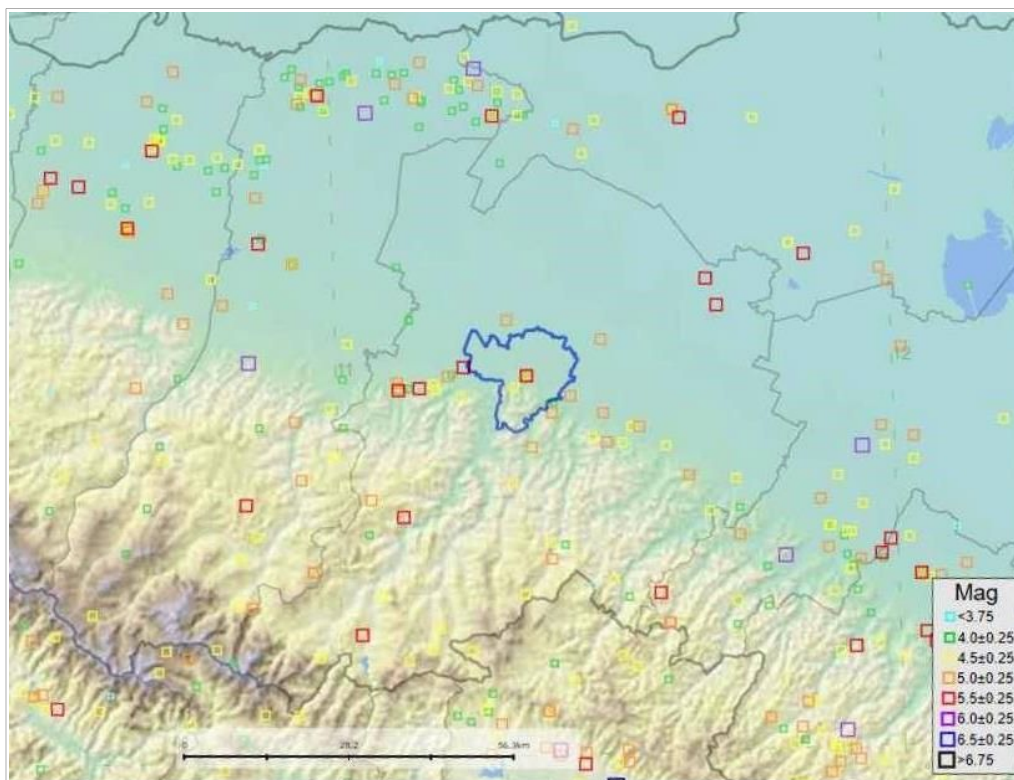
Oltre al già citato evento del gennaio 1505, altri due terremoti hanno prodotto effetti pari al grado VIII della scala MCS in area Bolognese e sono la scossa del 6 febbraio 1455 (localizzata in modo assai incerto nella Media Valle del Reno, all'altezza di Marzabotto) e quella del 20 aprile 1929, localizzata tra i comuni di Monteveglio e Monte San Pietro, una decina di chilometri a sud-ovest del comune di Calderara di Reno.

Viene di seguito riportato un estratto della sintesi degli effetti principali proposta dal catalogo CFTI5Med per la sequenza sismica del 1929:

La sequenza sismica del 1929, caratterizzata da quasi 100 scosse, cominciò il 10 aprile 1929 e si protrasse fino all'ottobre successivo. Gli eventi di maggiore intensità furono sei e avvennero nell'intervallo di un mese: il 10 aprile (ore 5:43:12 GMT), il 19 aprile (4:15:22 GMT), il 20 aprile (1:09:46 GMT), il 22 aprile (8:25:33 GMT), il 29 aprile (18:35:59 GMT) e l'11 maggio (19:22:48 GMT). [...]. La terza scossa, avvenuta il 20 aprile, fu la più forte di tutta la sequenza: causò danni in

oltre 600 siti su un'area di 680 kmq del pedeappennino fra i fiumi Reno e Samoggia e fu sentita in tutta l'Italia centrosettentrionale fino alla Toscana e alle Marche, su un'area di circa 150.000 kmq. I danni maggiori, consistenti in crolli parziali e gravi dissesti strutturali, colpirono alcune località dei comuni di Monte San Pietro e Zola Predosa. Negli altri siti le tipologie di danno più diffuse furono: strapiombi di muri, lesioni più o meno gravi ai muri e agli architravi di porte e finestre, dissesti ai tetti e ai pavimenti, caduta di comignoli. [...].

Figura 2.2 –
Localizzazione
degli epicentri
degli eventi
sismici
riportati
nell'archivio
CPTI15 v.2.0



2.3 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana¹ è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale $ML=5.9$), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di $ML=4,8$ e la seconda di $ML=5,1$, con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse ($ML > 5$), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa ($ML=5.8$) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO).

¹ Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

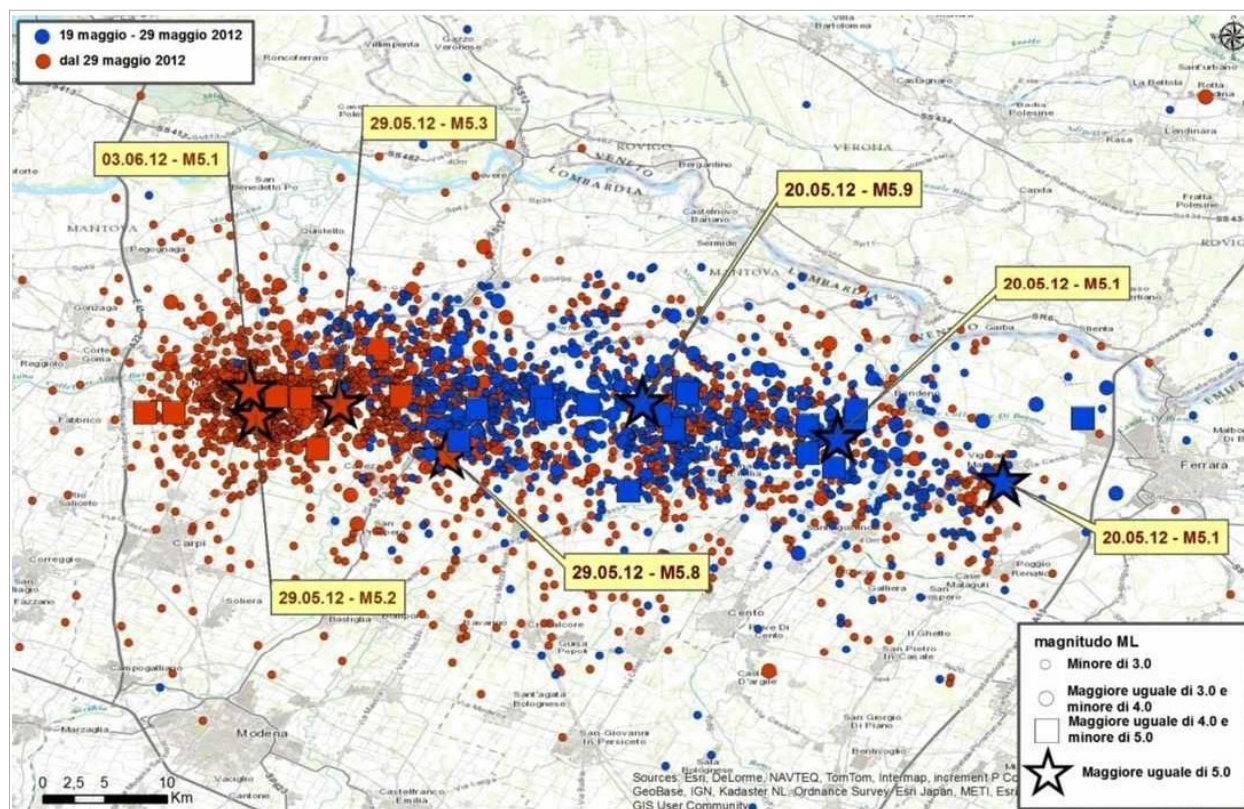


Figura 2.2 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

I maggiori effetti locali riscontrati sono risultati amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po². In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g. La figura 2.2 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) non attribuisce nessun valore di intensità per il Comune di Bologna riferibile al sisma emiliano 2012, in quanto i rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano solo i Comuni più settentrionali per quanto riguarda la Provincia di Bologna (ora Città Metropolitana di Bologna).

2.4 Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l’area in esame ricade nella Zona 912, caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6.14. La zona

² Fonte: “Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio–giugno 2012” – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e “Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale” a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

sismogenica 912 rappresenta la porzione più avanzata e sepolta della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale che si spinge fino al Po ed è caratterizzata prevalentemente da meccanismi di fagliazione inversa (Meletti & Valensise, 2004).

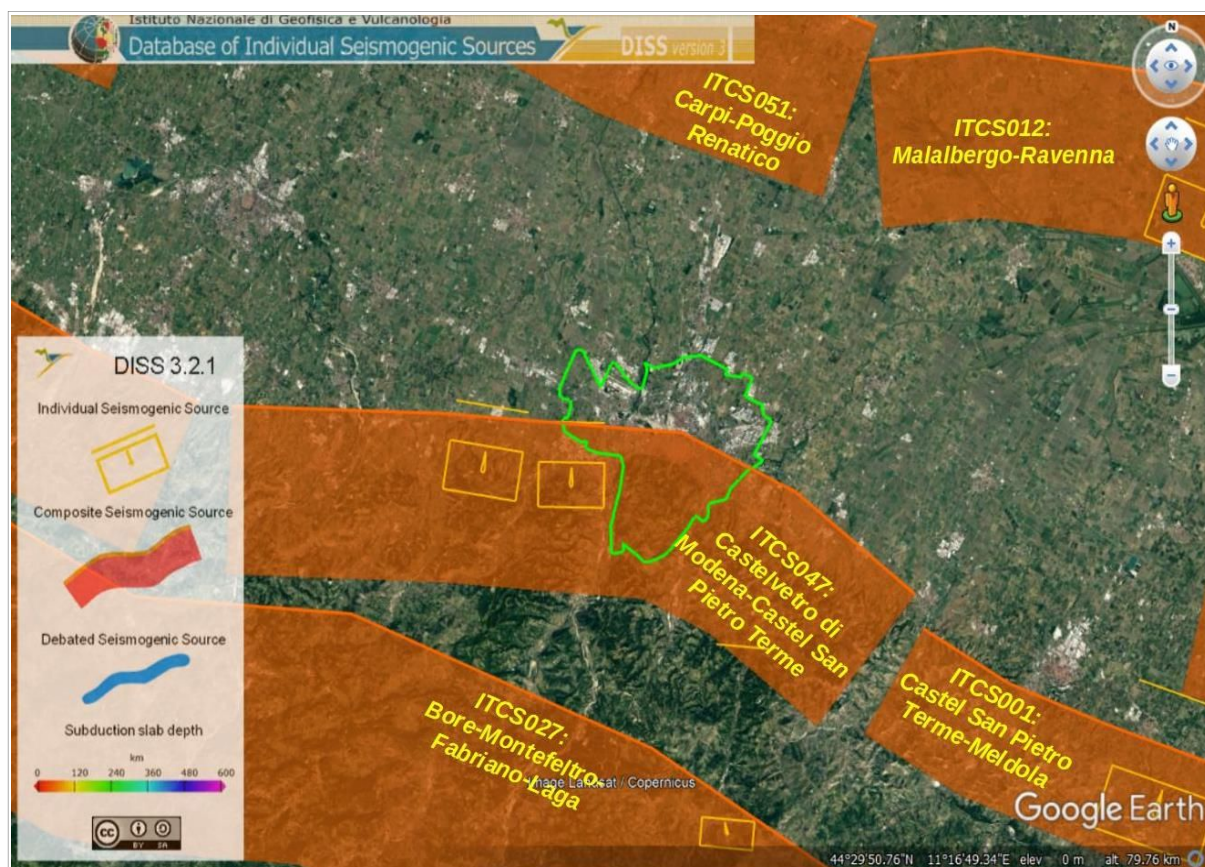


Figura 2.3 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2.1). Foto aerea: Google Earth

Il database DISS v. 3.2.1 (DISS Working Group, 2018) evidenzia come tutto il settore meridionale del territorio di Bologna risulti incluso nella sorgente sismogenica composta indicata con la sigla “ITCS047 Castelvetro di Modena–Castel San Pietro Terme” (figura 2.3). All'interno di questa sorgente sismogenica si concentrano i maggiori eventi sismici accaduti dell'area bolognese. Si tratta di una porzione del fronte compressivo pedeappenninico, caratterizzato da un sistema di faglie con prevalente vergenza nordest, a cui è associata una magnitudo massima pari a 6,0. La profondità è indicata tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra circa 0.2 e 0.6 mm/anno. Il database DISS v. 3.2 riporta anche due sorgenti sismogenetiche individuali, ITIS091 “Casalecchio di Reno” e ITIS103 “Crespellano”. Alla più vicina sorgente ITIS091 è attribuita una $M_w = 5,5$ associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2016): la zona epicentrale è stata stimata tra Zola Predosa e Bologna e sono documentati danni più consistenti a Zola Predosa, Bologna e S. Lorenzo in Collina (grado IX della scala Mercalli, cfr. Zecchi, 1882) ed i seguenti effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000), effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestininzi e Romeo, 2000).

Alla seconda sorgente ITIS103 è attribuita una magnitudo $M_w = 5,6$ associata al terremoto del 20 aprile 1929 (fonte: CPTI, 2016): a seguito di tale evento sismico sono documentati danni ad edifici ed infrastrutture con intensità pari al grado VII della scala Mercalli (Zecchi, 1982) ed anche effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali, emissioni di gas (Boschi et al., 2000).

Le più importanti questioni aperte citate nel database DISS, a cui è difficile dare una risposta allo stato attuale delle conoscenze, riguardano i tempi di ritorno dei terremoti associati alle sorgenti individuali e la magnitudo massima associabile all'area sottesa dalla sorgente composita.

Il territorio del comune di Bologna può anche risentire degli eventi sismici localizzabili nelle sorgenti sismogeniche composite più settentrionali ITCS051 “Carpi – Poggio Renatico” e ITCS012 “Malalbergo–Ravenna” alle quali vengono attribuite magnitudo massime $M_w = 6,0$. La sorgente ITCS051 include la faglia “Mirandola” recentemente riattivata (terremoti emiliani 2012). Il territorio comunale bolognese può inoltre risentire degli eventi sismici localizzabili più a sud nella zona sismogenica composita “ITCS027: Bore–Montefeltro–Fabriano–Laga”, che comprende un'ampia fascia di territorio appenninico fino al Marchigiano. Questa zona è caratterizzata da sismicità legata a meccanismi tettonici di compressione nella catena appenninica con terremoti caratterizzati da profondità ipocentrali generalmente comprese tra 12 km e 22 km. La magnitudo massima stimata di questa zona è pari a $M_w = 6,2$ desunta dall'analisi dei terremoti storici più significativi associati a questa ampia zona, tuttavia con epicentri piuttosto lontani dall'area studiata (Fabriano, 1741, Cagli, 1781, Camerino, 1799, Sarnano, 1873). La sorgente sismogenica individuale più vicina (distante circa 35 km dal Capoluogo) risulta la “ITIS058 “Loiano”, recentemente definita in seguito all'evento sismico del settembre 2003 ($M_w = 5,3$).

2.5 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale

2.5.1 *Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 – DGR 2193/2015 – DGR 630/2019)*

La Regione Emilia–Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia–Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia–Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la “pericolosità di base” elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con le più recenti DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, la Regione Emilia–Romagna ha introdotto ulteriori aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 114/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- ✓ nella definizione di ulteriori parametri di amplificazione riferiti all'intensità spettrale di

Housner (per l'intervallo di periodo T 0,5–1,5 s) e riferiti all'intensità spettrale in accelerazione (per i seguenti intervalli di periodo: 0,1–0,5 s, 0,4–0,8 s, 0,7–1,1 s, 0,5–1,5 s)

- ✓ nella richiesta di produrre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- ✓ nella richiesta di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di “Hazard” H_{SM} (Naso et al., 2019)

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento e forniscono inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

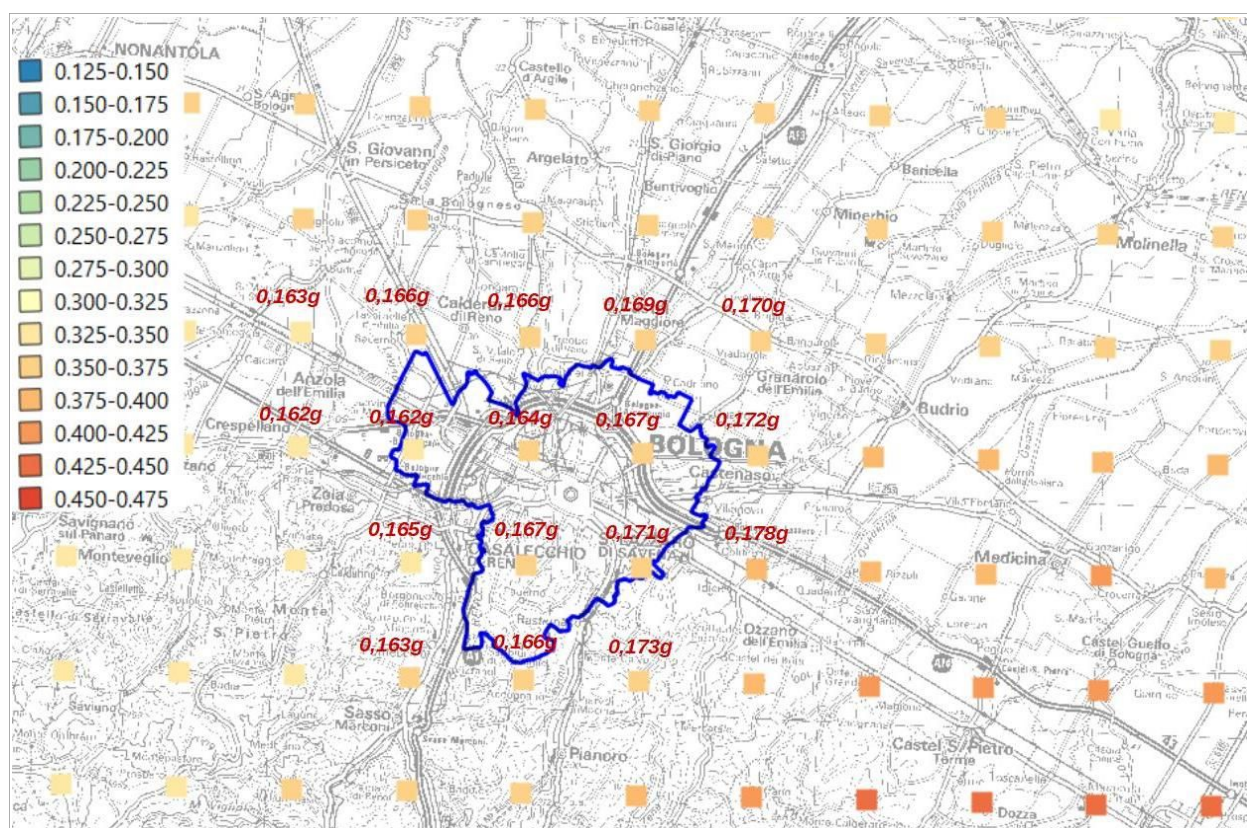


Figura 2.4 – Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Bologna

Per quanto riguarda la a_g al sito di riferimento ($a_{g,ref}$), la figura 2.4 riporta per il territorio comunale di Bologna i punti della griglia INGV e i relativi valori di $a_{g,ref}$ (mappa MPS04). Ai punti vengono attribuiti i parametri della pericolosità sismica di base e in particolare si attribuiscono il valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio urbanizzato/urbanizzabile, i valori di a_{refg} (per terremoti con TR =475 anni) sono compresi tra circa 0,176g e 0,162g, con una variabilità relativamente modesta della pericolosità “di base”, in diminuzione da SE a NO.

2.5.2 Il rischio sismico definito nel PTCP della Città Metropolitana di Bologna

La Provincia di Bologna (ora Città Metropolitana di Bologna) ha provveduto all'elaborazione di studi di pericolosità sismica preliminare dell'intero territorio amministrativo, ai sensi della DAL regionale n.112/2007. Gli esiti di tali studi sono contenuti nella <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>> approvata con Delibera del Consiglio Provinciale del n°57 del 28/10/2013.

In sintesi, la Provincia di Bologna ha elaborato la nuova Tavola di Piano, denominata “TAV. 2.C – Rischio sismico – Carta degli effetti Locali Attesi”, con restituzione cartografica alla scala di 1:65.000 per il territorio di pianura oppure alla 1:25.000 per il territorio di collina/montagna.

La Tavola 2C costituisce il primo livello di approfondimento sismico richiesto dalla DAL 112/2007, identificando gli scenari di pericolosità sismica locale dell'intero territorio provinciale. La cartografia ha definito una prima delimitazione delle aree omogenee dal punto di vista degli effetti locali attesi in caso di sisma; per tali zone, indica le indagini e le analisi di approfondimento che dovranno essere effettuate nelle successive fasi di pianificazione e, inoltre, le indicazioni normative sugli interventi ammissibili nelle aree caratterizzate da pericolo sismico elevato.

In questo senso, le disposizioni normative della Variante non appaiono di carattere escludente (eccetto per le zone di frana “attiva”) in termini di previsione di nuovi interventi, ma impongono l'esecuzione di ulteriori approfondimenti delle indagini e degli studi geologici in funzione della pericolosità sismica riscontrata nella Tavola 2C. La citata Tavola fornisce, in sostanza, le prime indicazioni sui limiti e sulle condizioni per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica. La normativa sismica del PTCP indica anche gli approfondimenti sismici richiesti nelle aree instabili dal punto di vista sismico, fino al “terzo livello” conoscitivo, da espletarsi nelle successive fasi di pianificazione comunale, per confermare o meno le condizioni di pericolosità preliminare e, dunque, le condizioni di fattibilità delle previsioni di trasformazione urbanistica.

3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico

L'assetto geologico strutturale del territorio studiato di Bologna è quello di zona di passaggio da “margine” appenninico-padano a pianura. Si rammenta che il margine appenninico rappresenta la zona frapposta tra “catena” e pianura, caratterizzata da rilievi collinari del basso Appennino e dalla fascia pedemontana della Pianura Padana.

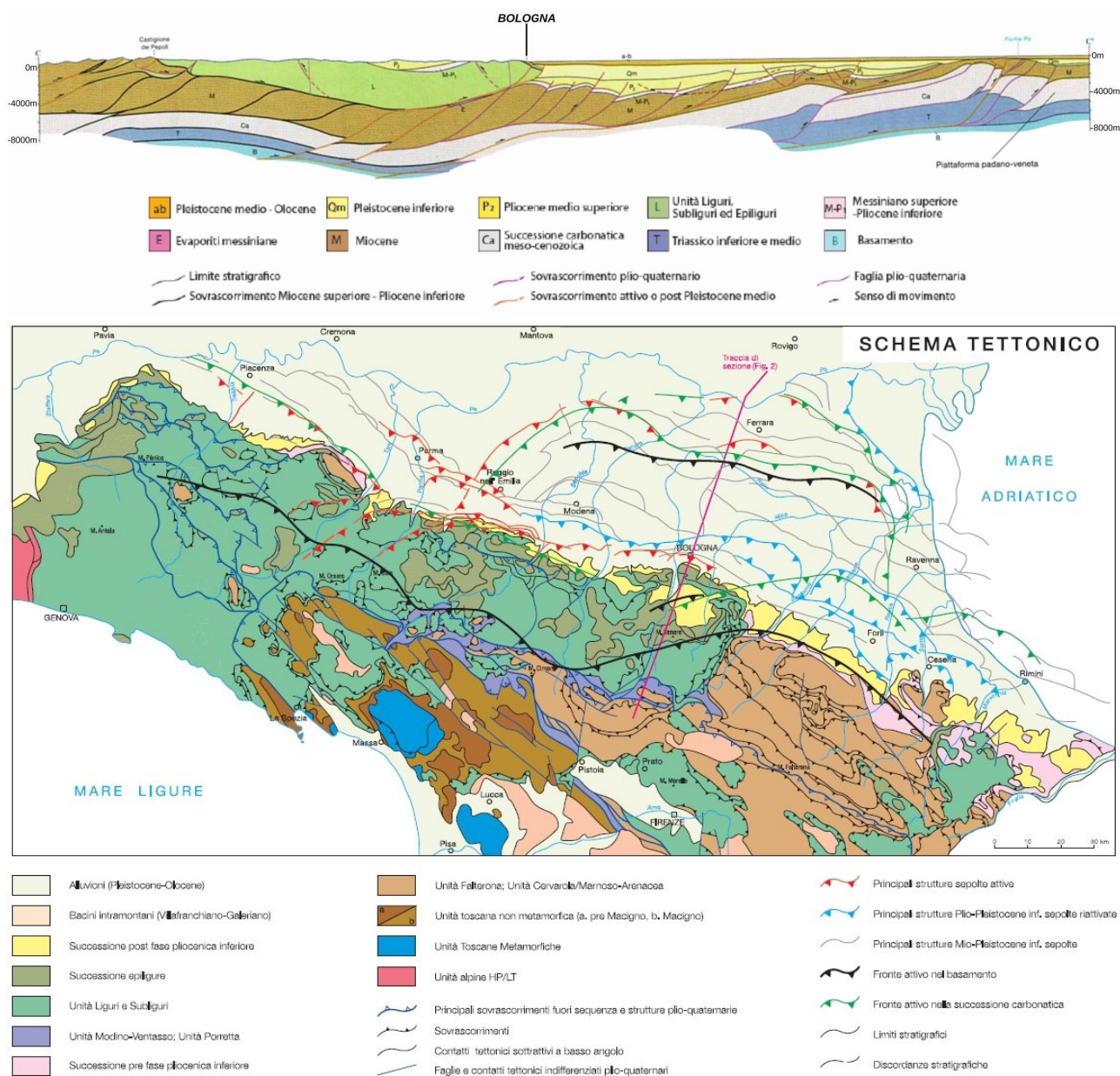


Figura 3.1 – Schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna” (ed. 2004)

La catena appenninica, in sintesi, è costituita da varie unità tettoniche alloctone, ovvero originate in zone paleogeografiche diverse, sradicate e impilate una sull'altra da sud verso nord, a seguito dell'orogenesi che, a partire dall'Oligocene (circa 30 milioni di anni fa), ha portato alla strutturazione dell'Appennino settentrionale.

L'evoluzione del settore di margine appenninico-padano è più in particolare legata all'attività del sistema di faglie del fronte pedeappenninico (Pedeappenninic Thrust Front, PTF, di Boccaletti et al., 1985). Tale fronte è dunque individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi (M. Pieri & G. Groppi, 1981). In figura 3.1 è rappresentato il quadro geologico strutturale locale che identifica i rapporti tra catena e pianura nel territorio studiato, basato anche sui dati e sulle ricostruzioni effettuate dall'AGIP (M. Pieri e G. Groppi, 1981). Questa figura, pubblicata nelle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004), riporta una sezione geologica di sintesi, ricostruita da Castiglione dei Pepoli, passando per Bologna, fino al fiume Po.

La figura 3.2 presenta un ulteriore e più aggiornato schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo tratto dalle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016). La figura 3.2 conferma come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il limite dell'appennino affiorante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.



Figura 3.2 – Schema tettonico aggiornato del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016)

La figura 3.3 rappresenta uno stralcio della Carta Sismotettonica (ed. 2016) nella quale, per il settore di catena e margine appenninico, si riportano i limiti delle unità geologiche affioranti (si rimanda per i maggiori dettagli alle relative Note Illustrative per maggiori dettagli). Il territorio collinare bolognese studiato può essere così descritto:

1. la zona più settentrionale di margine affiorante, è caratterizzata da depositi attribuiti alla successione post-evaporitica del Dominio Padano-Adriatico, costituiti da peliti e arenarie poco cementate del Pliocene inferiore-Pleistocene (unità affioranti IMO, FAA), immergenti sotto i sedimenti alluvionali dell'antistante pianura (“monoclinale pedeappenninica” nordvergente). Questo raccordo con la pianura cela, come già scritto, le strutture geologiche sepolte che sono evidenziate nelle precedenti figure 3.1 e 3.2. Le formazioni a tessitura prevalentemente argillosa (FAA) sono facilmente degradabili e possono evolvere in calanchi, ed altre forme di erosione superficiale.

Il sollevamento connesso alla tettonica attiva di “thrust” pedeappenninico ha determinato anche il basculamento/sollevamento delle coperture alluvionali più antiche (tardo Pleistocene) che ricoprono i depositi del substrato marino di margine affiorante;

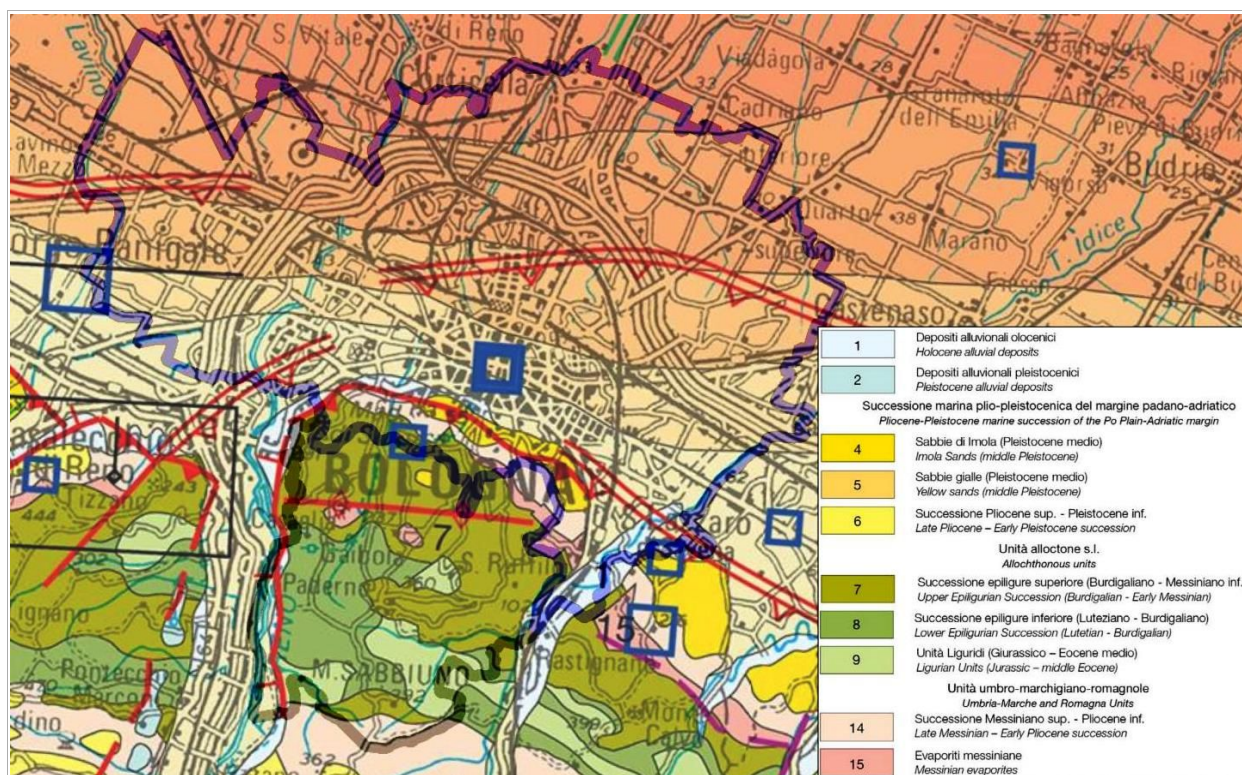


Figura 3.3 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (ed. 2016) e della sua legenda (unità geologiche affioranti), con sovrapposti i limiti comunali di Bologna e dell'area studiata.

2. una zona contraddistinta dagli affioramenti delle unità evaporitiche messiniane (Formazione Gessoso-Solfifera GES). Questa dorsale gessosa, si sviluppa prevalentemente in direzione SO-NE ed è anche caratterizzata da forme di carsismo. Nell'area di studio, le azioni deformative tettoniche indotte dal sollevamento dei gessi (iniziato in concomitanza con l'avanzamento del fronte appenninico dal Messiniano superiore) e le diverse caratteristiche reologiche delle rocce coinvolte hanno prodotto una serie di dislocazioni. Inoltre, le evaporiti messiniane hanno subito processi di erosione e risedimentazione: in questi casi, alla discordanza basale è associata anche una lacuna erosiva e il substrato della successione post-evaporitica è costituito dalle peliti sommitali della Successione Epiligure (marne della Formazione del Termina - TER - e della Formazione di Cigarello);
3. una grande struttura anticlinale che interessa il territorio studiato più meridionale, anche ben oltre tale limite, mostra in affioramento unità della Successione Epiligure più antiche e fortemente tettonizzate. È localmente caratterizzata da unità geologiche a tessiture da prevalentemente marnose (CIG; TER) a lapidee stratificate (Formazione di Pantano - PAT). Questa zona, nei settori con substrati prevalentemente pelitici, è inoltre caratterizzata da versanti frequentemente instabili e da processi d'erosione (fino a forme calanchive).

Come già scritto, l'evoluzione della pianura è anch'essa condizionata dall'attività dei “thrust” del fronte pedeappenninico e delle strutture padane sepolte descritte da Pieri e Groppi (1981). Mentre la strutturazione dell'Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica (Miocene superiore–Pliocene inferiore), la principale attività tettonica del suo margine, ovvero del suo fronte deformato e sepolto, è prevalentemente attribuita al Pliocene medio-superiore e Quaternario.

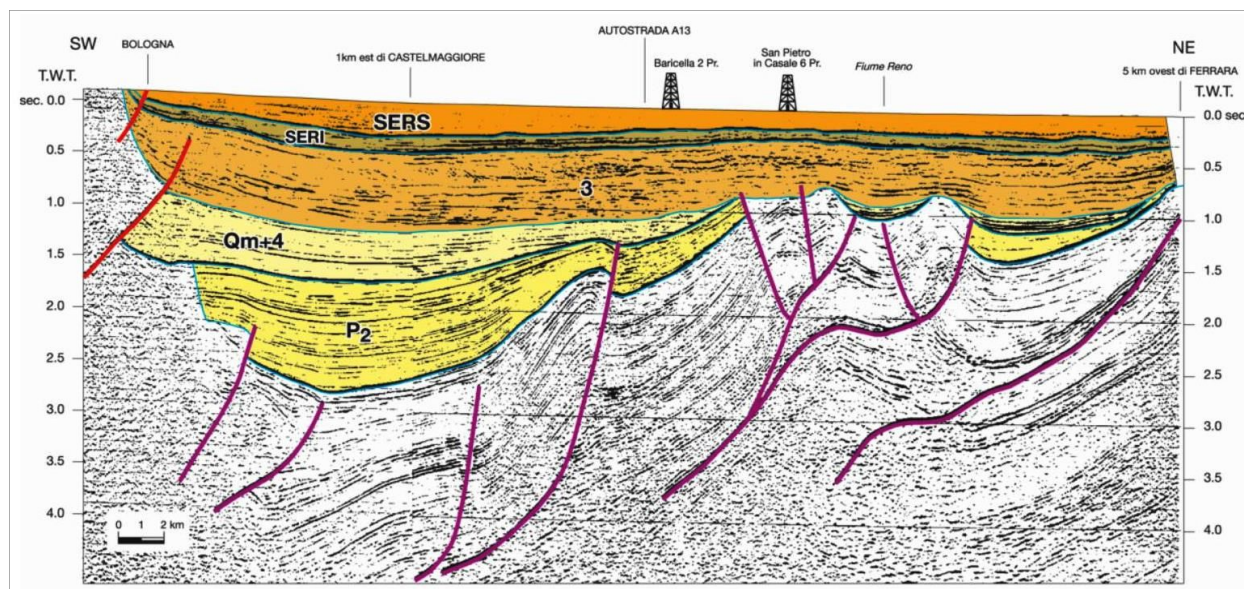


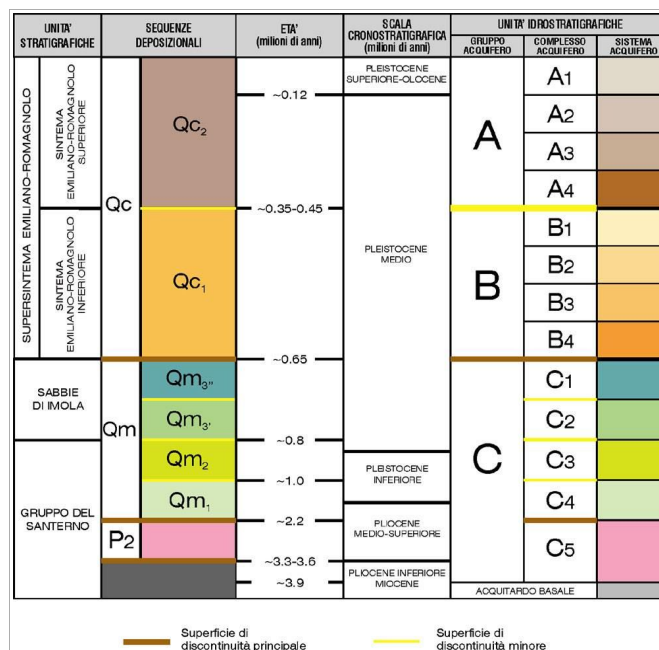
Figura 3.4 - Profilo sismico rappresentativo del territorio di pianura, da Bologna a Ferrara (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe – ed. 2016).

Nella pianura, gli studi geognostici e sismici (RER-ENI, Agip) permettono di ricostruire l'assetto tettonico ed i meccanismi deformativi del margine fronte sepolto. In sintesi, il fronte di sovrascorrimento sepolto è costituito da un sistema di elementi tendenzialmente arcuati, articolati fra loro da un sistema di faglie trasversali ad andamento antiappenninico che rappresentano veri e propri svincoli cinematici a carattere trascorrente e lungo cui si sono avuti anche importanti movimenti verticali (figura 3.4). Le deformazioni del fronte hanno dato luogo alla formazione di bacini (sinclinali) e accavallamenti (“thrust” nord vergenti, associati ad anticlinali) e il risultato finale è quello di un consistente impilamento dei depositi sedimentari plio-pleistocenici, suturati dai depositi continentali di età più recente (Quaternario).

La Pianura Padana è dunque formata dai depositi di riempimento del bacino di avanfossa di età plio-quaternaria che ricoprono le strutture tettoniche sepolte del fronte appenninico. In questo senso, il settore più settentrionale del territorio comunale di Bologna ricade in un contesto che risulta di sinclinale, collocato tra il fronte pedeappenninico emerso (a sud) e la terminazione occidentale delle “Pieghe Romagnole” (più a nord). La sovrastante coltre di riempimento alluvionale è caratterizzata da alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille (in funzione dell'evoluzioni delle facies deposizionali dominanti, di età Pleistocene medio-Olocene e prevalentemente attribuibili ai fiumi Reno, Savena e in minor misura al Lavino, con spessori che rapidamente aumentano verso nord).

La classificazione stratigrafica dei sedimenti alluvionali di riferimento per questo lavoro è quella proposta e utilizzata in Regione Emilia–Romagna & ENI–AGIP (1998), nonché indicata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e come ulteriormente schematizzato in figura 3.5.

Figura 3.5 – Schema stratigrafico dei depositi plio – quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (RER & ENI–AGIP, 1998).



Convenzionalmente, le coperture alluvionali sono riferibili a due principali e successivi cicli deposizionali così denominati convenzionalmente:

- il “Sintema Emiliano–Romagnolo Inferiore” (SERI o AEI), che costituisce lo spessore di alluvioni più profonde e sovrapposte ai depositi marini plio–pleistocenici (di età compresa da circa 0,7 Ma a circa 0,45/0,40 Ma);
- il Sintema Emiliano–Romagnolo Superiore (SERS o AES), di età compresa da 0,45/0,40 Ma all'attuale (RER & ENI–Agip, 1998).

Nella Pianura Padana, lo spessore complessivo dei depositi alluvionali è fortemente variabile, in funzione della morfologia delle strutture tettonizzate sepolte: studi RER & ENI–Agip (1998). In questo senso, la Carta Sismotettonica della Regione Emilia–Romagna (figura 3.3) riporta le isobate riferite al Imm della base del sintema SERS, con spessori complessivi che nel territorio comunale bolognese più settentrionale (es. zona “Corticella”) superano i 250 metri.

All'interno del SERS sono classificate unità di range inferiore (subsintemi) e costituiti da alternanze cicliche di depositi fini (argille e limi, prevalenti nel territorio nord–orientale e nel territorio più occidentale) e depositi prevalentemente sabbiosi o sabbioso ghiaiosi (in corrispondenza degli apparati di conoide dei fiumi Reno, Savena e Lavino).

Ulteriori dettagli sulla stratigrafia del sottosuolo (substrato roccioso e coperture quaternarie) vengono riportati nel paragrafo 3.3 e nel capitolo 5 (modello di sottosuolo).

3.2 Ulteriori dati geologici e morfo–strutturali in aree con evidenze di attività tettonica recente

Le “Note Illustrative” prodotte a corredo della carta sismotettonica dell'Emilia–Romagna, nelle due edizioni fin qui pubblicate (2004 e 2016), hanno approfondito su particolari evidenze di attività tettonica recente riscontrate in settori di catena, di margine e di pianura della regione. Rilievi geologici, sismici nonché studi morfo–tettonici indicano come la tettonica attiva sia

generalmente caratterizzata dalla presenza di strutture compressive attive, come sovrascorrimenti e piegamenti, come evidenziano anche i meccanismi focali di terremoti noti (Gasparini et alii, 1985; Boccaletti et alii, 1985; Anderson & Jackson, 1987; Frepoli & Amato, 1997; Mariucci et alii, 1999; Benedetti et alii, 2000–2003; Selvaggi et alii, 2001).

Rispetto al territorio in esame, l'andamento geografico del principale spartiacque evidenzia come la catena appenninica risulti dislocata tra le valli del Reno e del Panaro. Vari Autori, hanno descritto strutture tettoniche trasversali all'asse principale, orientate NNE–SSW, che svincolano la catena in questo settore caratterizzato da deformazione attiva prevalentemente lungo il “thrust” appenninico (Ghelardoni, 1965; Bortolotti, 1966; Castellarin et al., 1985; v. anche Martelli, 2015; Martelli et al. 2017; ecc.).

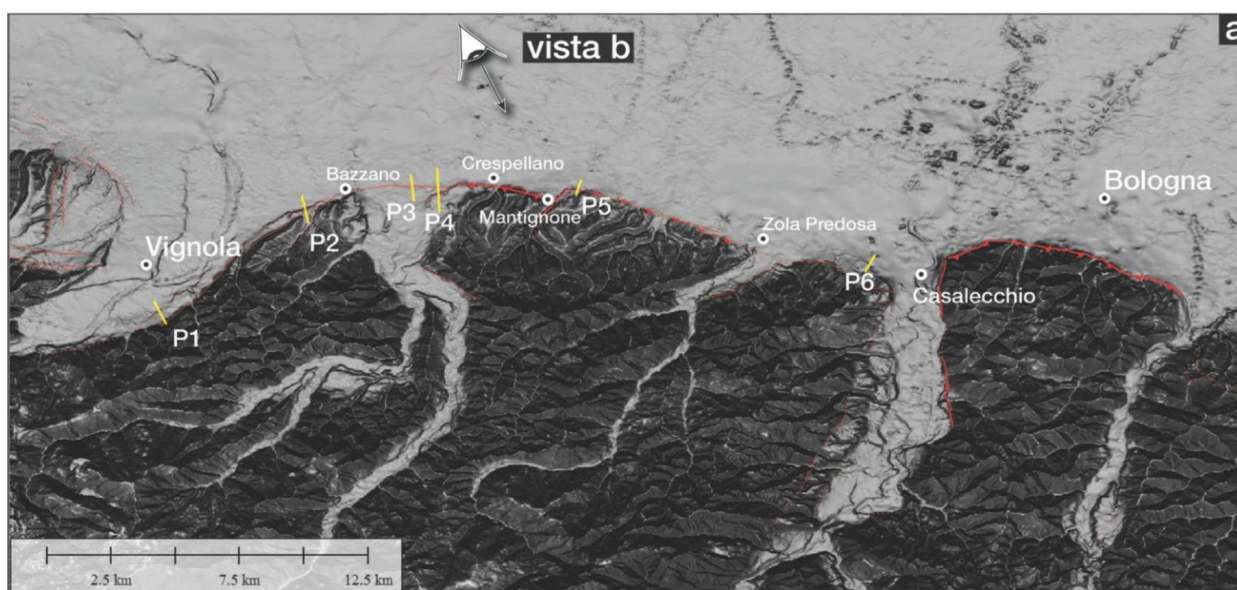


Figura 3.6 – Elaborazione DEM del fronte affiorante del margine appenninnico tra Vignola e Bologna (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia–Romagna e aree limitrofe – ed. 2016).

Ulteriori evidenze sono riscontrabili lungo il limite morfologico collina–pianura e in particolare si possono individuare alcune strutture trascorrenti minori, con orientazione SW–NE e componente di movimento orizzontale sinistro, che dislocano il fronte del margine affiorante tra le valli dei fiumi Panaro e Reno, come ben rappresentato nella figura 3.6. . Nel settore Casalecchio–Bologna, si riscontra una dislocazione sinistra del fronte di quasi 4 km (Boccaletti et al., 2004), con il limite morfologico collina–pianura, ad est del Reno, che risulta infatti più avanzato verso nord.

Lungo tutto questo tratto di margine, i terreni che costituiscono i versanti collinari sono costituiti da alluvioni del Sintema Emiliano–Romagnolo superiore (SERS <450.000 anni) in discordanza sulle Sabbie di Imola. Questi terreni si collocano a quote chiaramente superiori a quelle di deposizione e risultano interessati anche da piegamenti, fratture e faglie mesoscopiche, come riscontrato in diversi affioramenti nella valle del Panaro, tra Vignola e Bazzano, nelle colline a sud di Crespellano e Zola Predosa e nella periferia nord di Casalecchio di Reno (Ghiselli e Martelli, 1997). Altri riscontri relativi a deformazioni mesoscopiche nelle Sabbie di Imola e nei depositi del SERS sono state rilevate anche a est di Bologna, presso Varignana.

Tutte queste evidenze di deformazioni superficiali (compressive) risultano inoltre coerenti con

l'attività del “thrust” pede-appenninico, con direzioni di compressione compresi tra N-S e NW-SE (Martelli et al. 2017). Più in particolare, si è appurata la presenza di un'anticlinale di crescita, parallela al margine pede-appenninico, nelle colline a sud di Bologna caratterizzate da substrato affiorante appartenente alle unità liguri e nei depositi di età compresa tra il Messiniano (Formazione Gessoso-Solfifera) ed il Pleistocene medio (Sabbie di Imola). Questa struttura è caratterizzata da rotture del pendio con una scarpata basale lateralmente continua (figura 3.7). In alcune aree tale scarpata sembra interessare anche depositi olocenici di conoide.

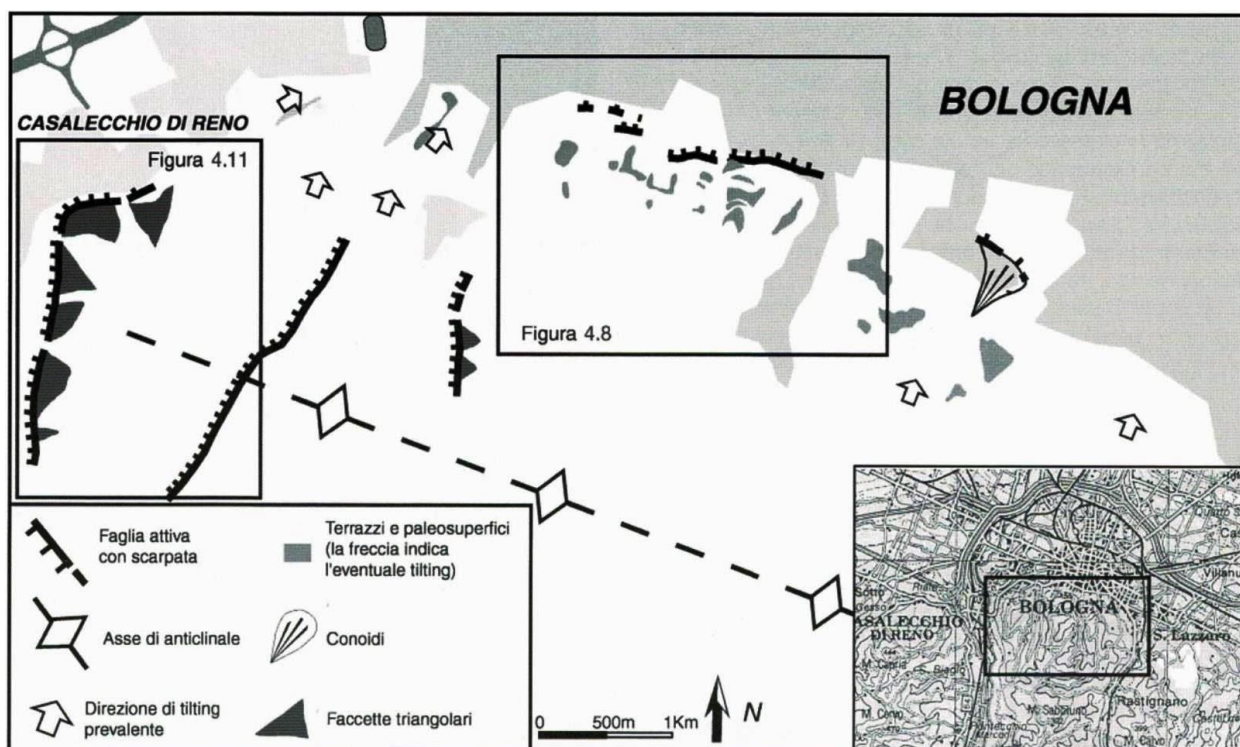


Figura 3.7 – Schema morfo-strutturale del settore collinare a sud di Bologna (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna – ed. 2004).

3.3 Stratigrafia

3.3.1 Substrato marino

I dati conoscitivi sono derivati dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna³. Un ulteriore riferimento per questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG)⁴.

Come già descritto, il territorio di Bologna interessato dalla microzonazione sismica è costituito da bedrock affioranti appartenenti alla Successione Epiligure, ai depositi evaporitici messiniani e alla successione post-evaporitica del margine padano-adriatico.

La figura 3.8 rappresenta un'ulteriore schema di sintesi delle principali litologie (affioranti o meno).

³ Cartografia interattiva consultabile on line: https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss.

⁴ E Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Foglio 220 – Casalecchio di Reno)

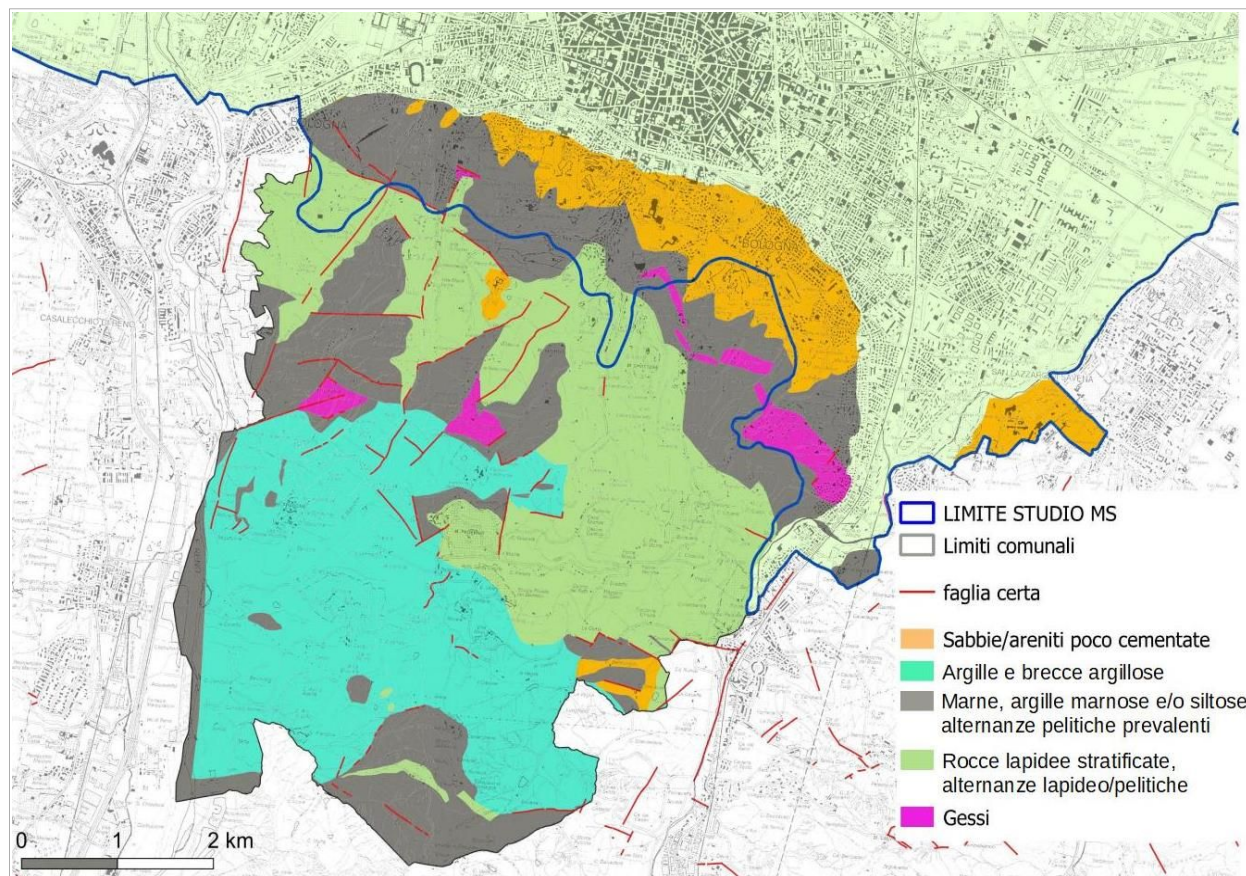


Figura 3.8- Schema geologico di sintesi del settore collinare di Bologna (litologie prevalenti)

SUCCESSIONE POST-EVAPORITICA DEL MARGINE PADANO-ADRIATICO:

Sabbie di Imola (IMO) → questa unità affiora diffusamente al margine appenninico e rappresenta la più recente tra le unità marine dell'appennino. Sono costituite da depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi, di ambiente costiero e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna. Le Sabbie Gialle sono state convenzionalmente suddivise in tre sub unità (membri), corrispondenti a differenti cicli deposizionali: nell'area di studio risultano affiorare depositi IMO1 (membro di Monte Castellaccio) corrispondenti a sabbie e ghiaie del ciclo basale trasgressivo, e depositi IMO3 (membro di Castel San Pietro) corrispondenti alle sabbie di tetto del secondo ciclo trasgressivo. Le Sabbie gialle sono attribuibili alla parte terminale del Pleistocene inferiore e Pleistocene medio.

Argille Azzurre (FAA) → si tratta di argille, argille marnose, marne argillose e siltose grigie e grigio-azzurre (con subordinati strati arenacei) di ambiente deposizionale variabile da scarpata a piattaforma (localmente litorale). Nel territorio studiato, il suo limite inferiore è netto, discordante sulle unità più antiche TER, GES e FCO. Età deposizionale: Pliocene inferiore - Pleistocene inferiore.

EVAPORITI MESSINIANE:

Formazione Gessoso - Solfifera (GES) → depositi di ambiente deposizionale evaporitico/lagunare, costituiti da banchi di gesso selenitico (con cristalli geminati a "coda di rondine"), oppure gessoareniti o gessoruditi, che si alternano ad argille siltose bituminose grigio scure o nerastre e sottili livelli siltitici. Il limite inferiore è netto su TER. Nell'area di studio

risultano in affioramento (oppure sovrastati da depositi quaternari) soprattutto presso Monte e in alcuni ulteriori lembi. In queste unità si sviluppano anche numerose cavità ipogee. Età deposizionale: Messiniano inferiore.

SUCCESSIONE EPILIGURE:

Formazione del Termina (TER) → depositi di ambiente deposizionale di scarpata e piattaforma esterna, costituiti da marne argillose, talora siltose grigio scure e localmente bituminose, con rari strati arenacei. Nell'area di studio il limite inferiore è netto su CIG e PAT. Età deposizionale: Tortoniano.

Formazione di Cigarello (CIG) → depositi di ambiente deposizionale di piattaforma esterna e scarpata, con locali fenomeni torbidity (frane sottomarine). Sono costituiti da marne siltose – argillose generalmente grigie – beige in strati medi e spessi e con alternati arenarie siltose medio – fini. Il limite inferiore passa gradualmente a PAT. Età deposizionale: Langhiano – Tortoniano (parte basale).

Formazione di Pantano (PAT) → depositi di ambiente deposizionale variabile da litorale e piattaforma esterna. Sono costituiti da areniti siltose fini e finissime grigie – beige, alternate a peliti marnose grigio chiare. Verso l'alto compaiono livelli di marne siltose grigio azzurre.

3.3.2 Coperture quaternarie

I dati conoscitivi di riferimento sono ancora derivati dalla Carta Geologica dell'Emilia–Romagna alla scala 1:10.000 e dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG). La figura 3.9 offre una rappresentazione di sintesi di questi depositi continentali nel territorio studiato.

Per quanto riguarda i depositi di origine alluvionale, occorre rammentare che le citate cartografie geologiche regionali e nazionali distinguono le coperture alluvionali del Sintema Emiliano–Romagnolo Superiore (SERS) secondo la convenzionale classificazione stratigrafica per cicli deposizionali (R.E.R., ENI–AGIP, 1998), ovvero classificati per subsistemi identificati con le sigle “AES5” (più antichi) ad “AES8” (più recenti).

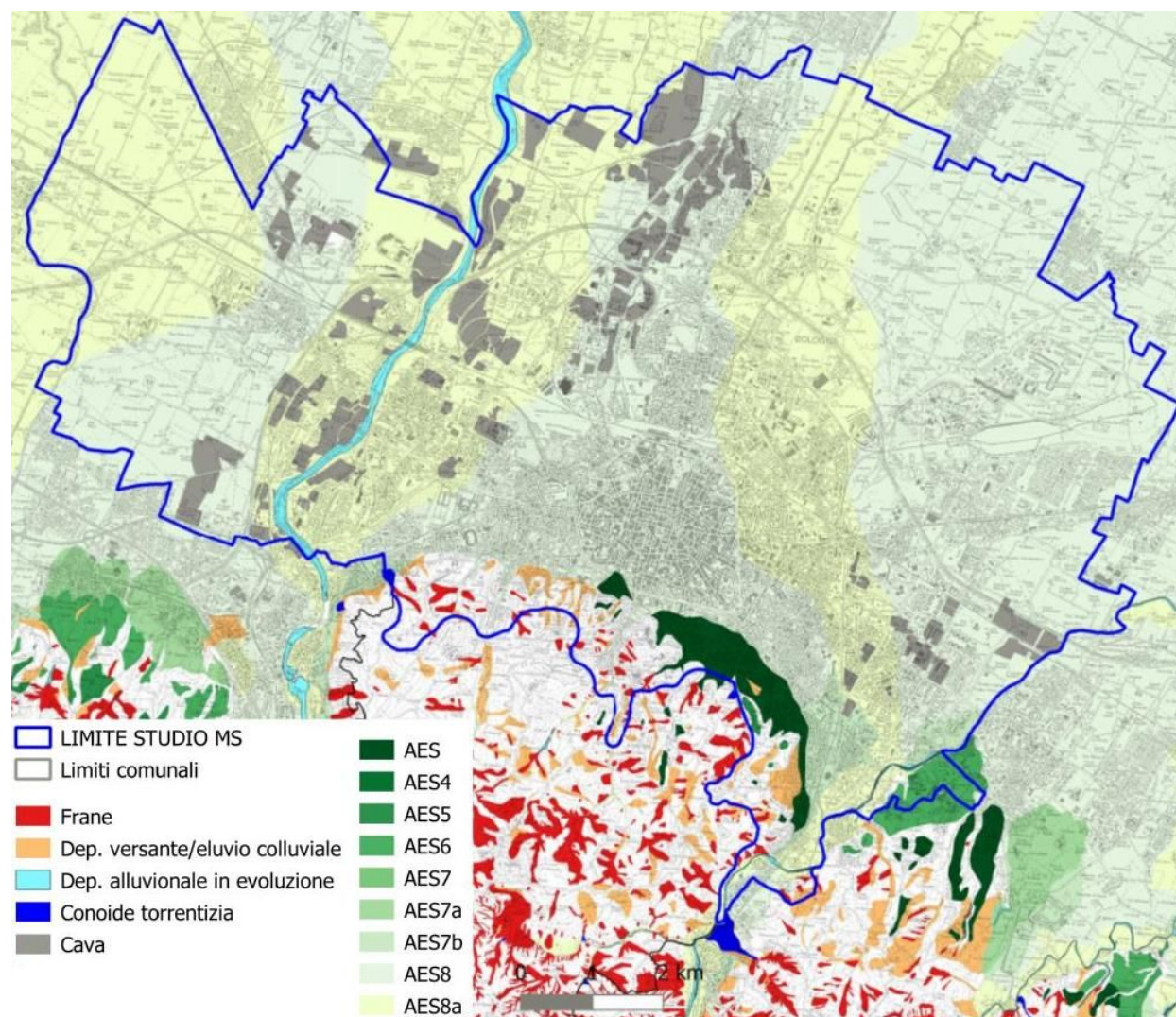


Figura 3.9 – Depositi continentali quaternari nel territorio studiato di Bologna (alluvionali; di versante ed eluvio-colluviali; frane)

Depositi “AES8” (Subsistema di Ravenna) → Si tratta di sedimenti che nei settore intravallivi (es. Aposa, Meloncello, Ravone risultano prevalentemente sabbioso limosi anche argillosi. Nel fondovalle del Savena e negli sbocchi vallivi Reno e ancora Savena, nelle relative piane alluvionali di conoide, i depositi sono caratterizzati da ghiaie (anche sub-affioranti), sabbie, limi e argille. L'età deposizionale è attribuita al Pleistocene sup- Olocene. Si rileva, inoltre, un ordine di terrazzo di rango inferiore, attribuito alla più recente Unità di Modena (sigla AES8a), di età Olocene – Attuale. Questi depositi, risultano morfologicamente distinti dalle alluvioni AES8 da scarpate di erosione fluviale.

Depositi “AES7” (Subsistema di Villa Verrucchio) → si tratta di depositi terrazzati di piana intravalliva affioranti lungo le valli e agli sbocchi vallivi: nell'area di studio sono attribuiti all'unità AES7b (“Unità di Vignola”) le alluvioni terrazzate in sinistra e destra Savena. L'età deposizionale è attribuibile al Pleistocene superiore.

Depositi “AES6” (Subsistema di Bazzano) → è costituita da depositi di conoide alluvionale terrazzati affioranti allo sbocco vallivo del Savena. Si tratta di alluvioni prevalentemente

ghiaiose e spesso sormontate da depositi fini (limi argillosi o sabbiosi; sabbie) di modesto spessore nei settori in affioramento (fino a circa 10 metri) e contatto inferiore erosivo con il bedrock marino IMO (Sabbie Gialle). Età deposizionale complessivamente attribuibile al pleistocene superiore.

Depositi “AES5” (Subsistema di Torre Stagni) → depositi alluvionali terrazzati prevalentemente ghiaiosi, passanti a sabbie, e sormontate da limi e argille frequentemente intercalati da suoli. Età deposizionale attribuibile al pleistocene medio.

Depositi “AES” indifferenziati → si tratta di sedimenti interfluviali (depositi di paleo conoide) della porzione basale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (di età attribuibile al Pleistocene medio), di difficile attribuzione ai subsistemi e prevalentemente caratterizzati da limi sabbiosi e/o sabbie limose. Nell'area di studio risultano affiorare con caratteristiche geometrie cuneiformi (blandamente basculate verso NNE), allo sbocco vallivo del Savena (in sinistra idrografica), fino a comprendere un'ampia porzione di terreni affioranti a ridosso dei primi colli bolognesi.

Depositi “b1” (depositi alluvionali in evoluzione) → Costituiti da ghiaie, talora embriciate, sabbie e limi argillosi di origine fluviale, attualmente soggetti a variazioni dovute alla dinamica fluviale; detrito generalmente incoerente e caotico, costituito da clasti eterometrici ed eterogenei, talora arrotondati, in matrice sabbiosa, allo sbocco di impluvi e valli secondarie e lungo gli alvei “attivi”.

Nel settore di collina sono inoltre distinte le seguenti coperture:

Depositi eluvio-colluviali e di versante → diffusamente riscontrabili al piede dei versanti e formati dal disfacimento per alterazione “in situ” o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità. La genesi dei depositi di versante può essere inoltre gravitativa, e/o da soliflusso.

Depositi di frana → la cartografia geologica regionale e l'archivio del Comune di Bologna rilevano numerose forme di dissesto di versante. Si tratta di movimenti di frana attivi o quiescenti con meccanismi d'innescio prevalentemente per scivolamento e/o colamento e che dovranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti per stabilirne l'effettiva condizione di instabilità in caso di sisma.

3.4 Idrogeologia

Il Comune di Bologna dispone di una ricostruzione del campo di modo della falda meno profonda elaborata per lo studio geologico del PSC⁵ (figura 3.10) basata su rilievi piezometrici effettuali nel 1997–1998. I dati evidenziano due vasti settori di territorio caratterizzati da soggiacenze della falda più significative: la prima in corrispondenza dell'asse fluviale Reno e la seconda corrispondente ad un'ampia porzione di conoide mediana del Savena.

⁵ Comune di Bologna – Quadro Conoscitivo PSC – Il sistema naturale e ambientale – Relazione Tecnica (a cura del geol. A. Fiori, 2008)

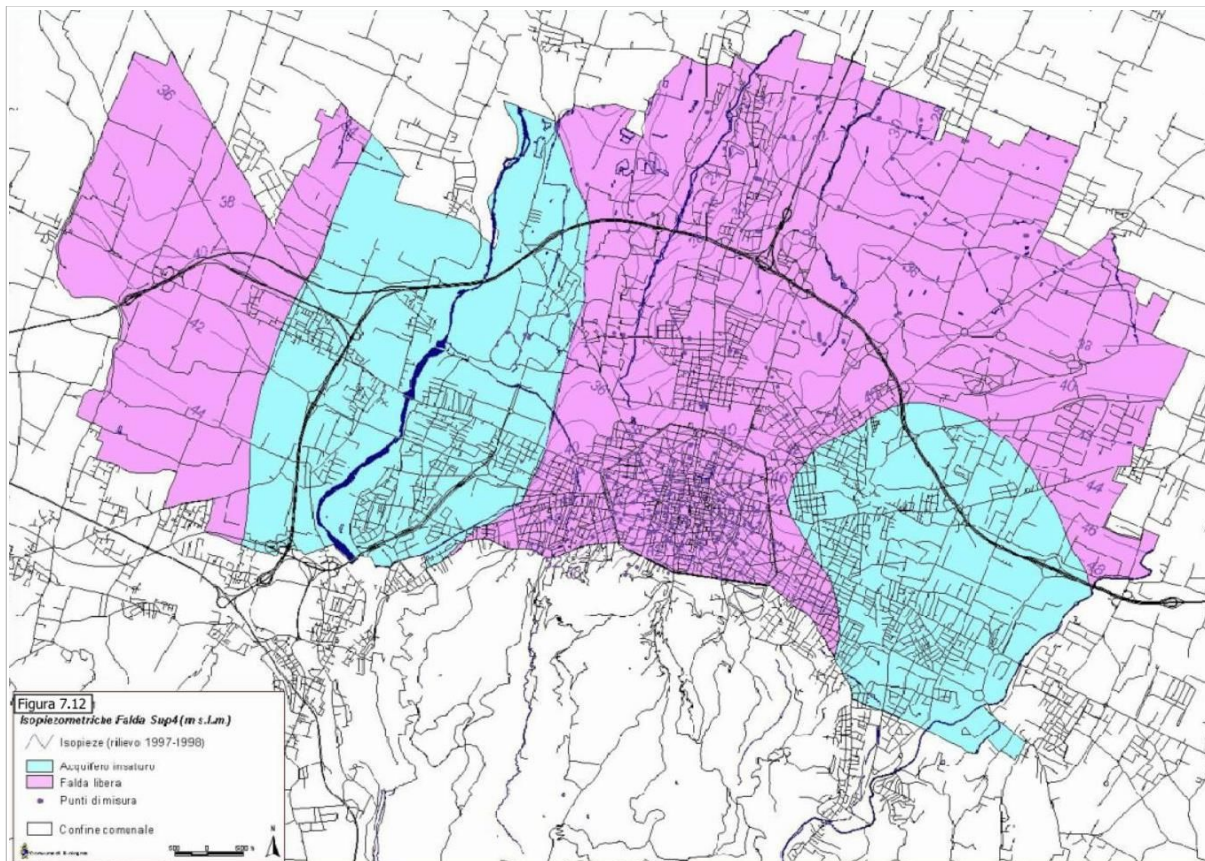


Figura 3.10 – Ricostruzione del campo di moto della falda più superficiale (fonte: Quadro Conoscitivo PSC di Bologna, 2008). Le zone in fucsia delimitano la falda libera mentre le zone in azzurro delimitano l'acquifero insaturato

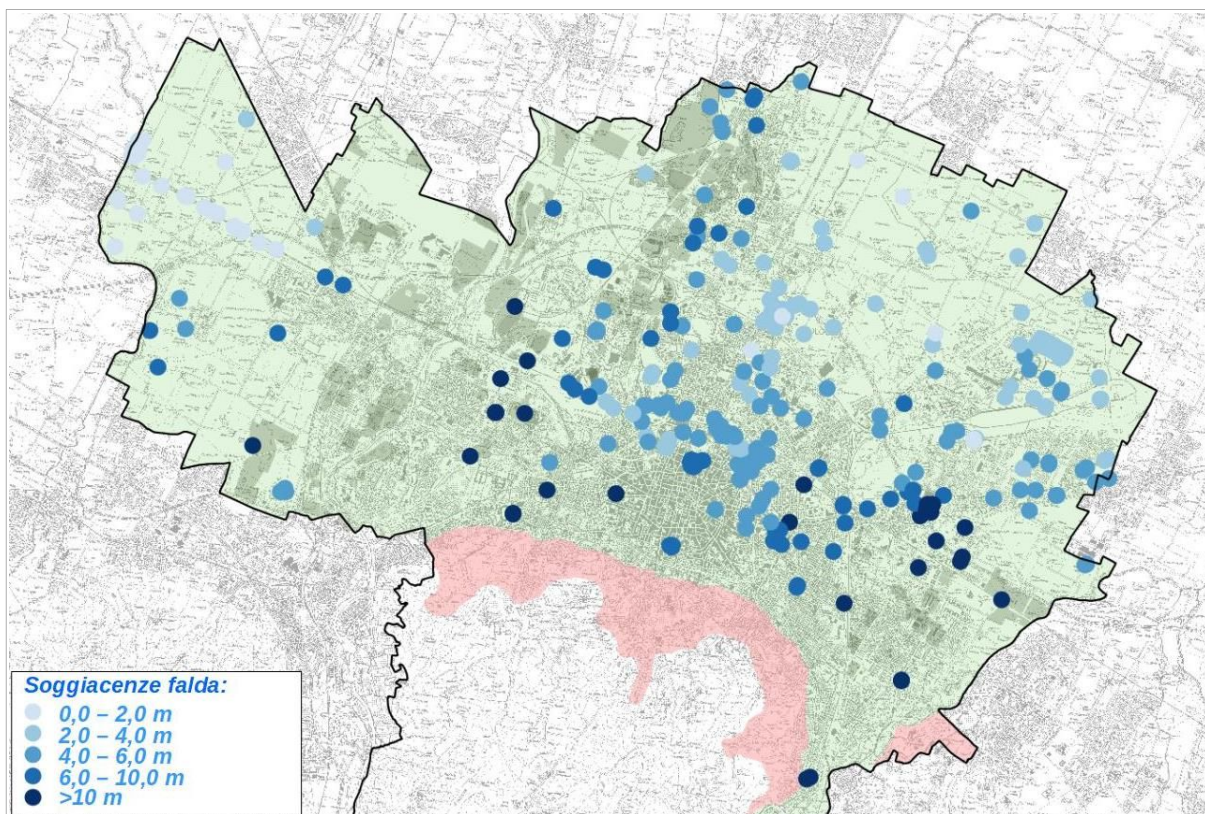


Figura 3.11 – Punti di controllo della piezometria (falda più superficiale) considerati per l'analisi della propensione alla liquefazione

Per questo studio, nelle prove geognostiche disponibili (es. penetrometrie CPT, CPTE, CPTU) sono state esaminate anche le quote d'acqua rilevate all'epoca dell'esecuzione e in particolar modo il controllo ha interessato le terebrazioni più recenti (figura 3.11). Da questo ulteriore, non sono tuttavia emerse significative differenze rispetto ai dati di oltre 20 anni fa.

Si evidenzia la discreta soggiacenza (>4 metri) che interessa tutto il settore meridionale dell'abitato e in particolare le zone “Centro”, “Murri”; “Saffi”, “Barca”, “Santa Viola” presumibilmente riconducibile alla scarsità di acquiferi granulari superficiali e all'impossibilità di “ricarica” superficiale indotta dall'elevata impermeabilizzazione dei terreni in questo settore di territorio densamente urbanizzato.

3.5 Cenni sulle cavità sepolte antropiche

Come noto, le cavità sepolte possono determinare condizionamenti nella propagazione delle onde sismiche in superficie nei casi di dimensioni e profondità significative. Si è dunque ritenuto pertinente al lavoro svolto effettuare alcune ricerche finalizzate a individuare elementi di potenziale criticità e di natura “antropica”, che interessano in particolar modo il territorio urbano (canali tombati; altri manufatti quali parcheggi interrati).

La città storica di Bologna è caratterizzata da un reticolo di canali artificiali medioevali (figura 3.12), in parte tombati, realizzati per il sostentamento idrico e commerciale e collegati ai fiumi naturali Savena, Reno e al torrente Aposa. Si tratta, per lo più di canalizzazioni e tombamenti di modeste sezioni, finalizzate a preservare velocità di deflusso utili per attività quali opicici e altre, ma anche per conservare scoli fognari cittadini efficienti.

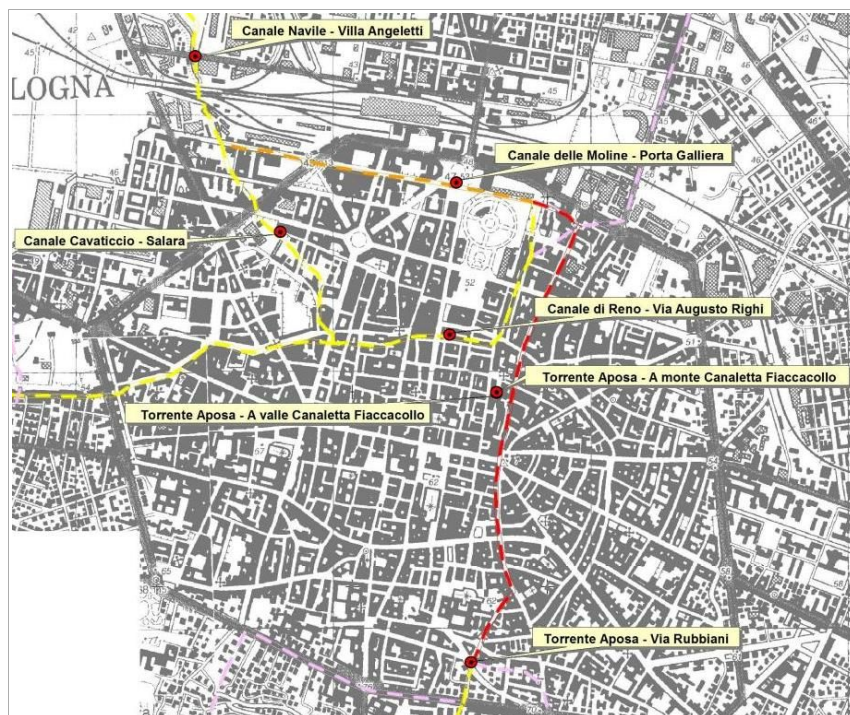


Figura 3.12– Rete dei principali canali della città (fonte: ARPA)

Sono tuttavia individuati alcuni tratti canalizzati di maggiore sezione, con funzioni di navigabilità: canale Navile/canale Cavaticcio e canale Reno.

Il canale Reno prende nome dal fiume di rifornimento, dal quale riceve acqua presso la chiusa

di Casalecchio. Dopo un percorso a cielo aperto, questo canale, largo circa 7 metri, diviene tombato presso l'intersezione con via Sacco e Vanzetti per poi proseguire al di sotto delle vie Valdossola, Sabotino, della Grada e poi Riva di Reno. Il canale Cavaticcio si origina dal canale Reno e alimenta il Porto Navile e risulta tombato fino all'intersezione verso nord con la via Bovi Campeggi.

Per questo studio, si è ritenuto utile riportare anche altri manufatti interrati, indicati dall'Amministrazione comunale, quali parcheggi interrati multipiano. Si è ritenuto utile riportare anche alcuni manufatti realizzati per il tratto urbano dell'Alta Velocità e in particolare la stazione e parte del sottoattraversamento in entrata/uscita da essa). La stazione AV di Bologna, infatti, è posta a 23 m sotto la superficie in corrispondenza del piazzale della Stazione Centrale ed è costituita da un "camerone" interrato (640 m di lunghezza, 41 m di larghezza e 23 m di profondità) che si sviluppa su tre livelli.

Gli elementi sopra descritti sono stati riportati nella cartografia MOPS come forme sepolte e in particolare classificate come "aree con cavità sepolte" (figura 3.13), mancando una specifica voce di legenda. A tali aree non si forniscono particolari condizioni di attenzione, tuttavia si vuole evidenziare la presenza di questi elementi quale dato conoscitivo ai fini delle analisi di rischio sismico a supporto di eventuali studi urbanistici e/o di progettazione in areali limitrofi.

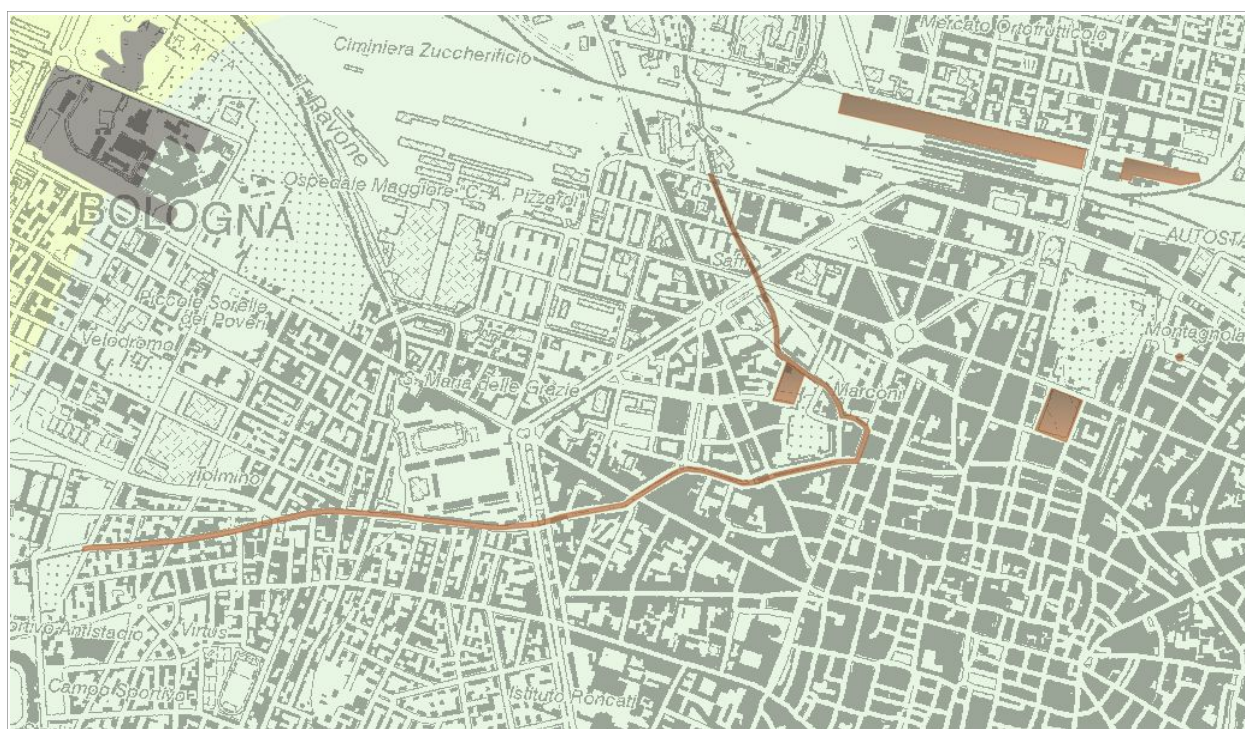


Figura 3.13- Delimitazione di alcune delle "aree con cavità sepolte" antropiche presenti nel territorio urbano del Capoluogo (canali Reno e Cavaticcio; Alta Velocità; parcheggi interrati) e riportate nella cartografia MOPS

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Lo studio ha previsto la raccolta, la selezione e il riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio comunale di Bologna. Si è potuto disporre di un notevole numero di prove geognostiche e geofisiche di repertorio (4077 prove complessive) fornite dall'Amministrazione comunale. Si tratta di prove relative a indagini geologiche, archiviate presso l'Ufficio Tecnico comunale e svolte per gli interventi più significativi di progettazione esecutiva (permessi di costruire) o per interventi di pianificazione (es: Variante Generale al Piano Regolatore e Varianti specifiche; Piani Particolareggiati; ecc.).

Le prove disponibili per lo studio di microzonazione, e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, risultano così distinte per tipologia (tabella 4.1):

Tipo identificativo (sigla)	Tipo indagine	n.
SS	Sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato	32
S	Sondaggio a carotaggio continuo	1202
SDS	Sondaggio a distruzione di nucleo che intercetta il substrato	61
SD	Sondaggio a distruzione di nucleo	855
CPT	Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)	828
CPTe	Prova penetrometrica statica con punta elettrica	97
CPTU	Prova penetrometrica statica con piezocono	90
DH	Prova sismica in foro tipo <i>Downhole</i>	16
CH	Prova sismica in foro tipo <i>Crosshole</i>	1
DL	Prova penetrometrica dinamica leggera	10
DN	Prova penetrometrica dinamica media	20
DMT	Prova dilatometrica	1
DS	Prova penetrometrica dinamica super pesante	36
ESAC_SPAC	Array sismico, ESAC/SPAC	6
HVSR	Stazione microtremore a stazione singola	310
PA	Pozzo per acqua	303
T	Trincea o pozzetto esplorativo	3
SP	Sondaggio con piezometro	20
MASW	MASW	126
REMI	Prova RefractionMicrotremors	48
SR	Profilo sismico a rifrazione	10
ERT	Tomografia elettrica	2

Tabella 4.1 – Elenco per tipologia e numero delle indagini geognostiche disponibili per questo studio

Le figure 4.1 e 4.2 rappresentano la distribuzione nel territorio studiato delle prove geognostiche e geofisiche disponibili.

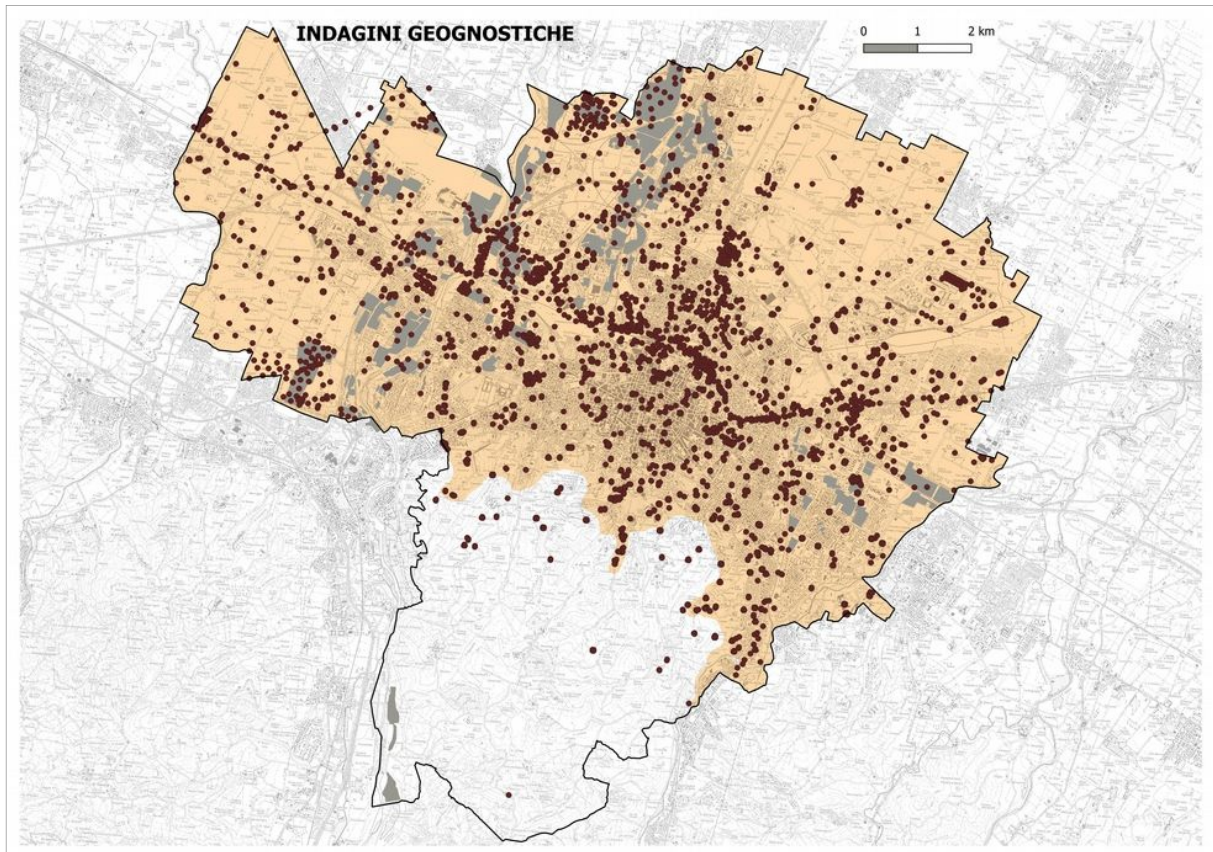


Figura 4.1 - Distribuzione delle indagini geognostiche disponibili per questo studio

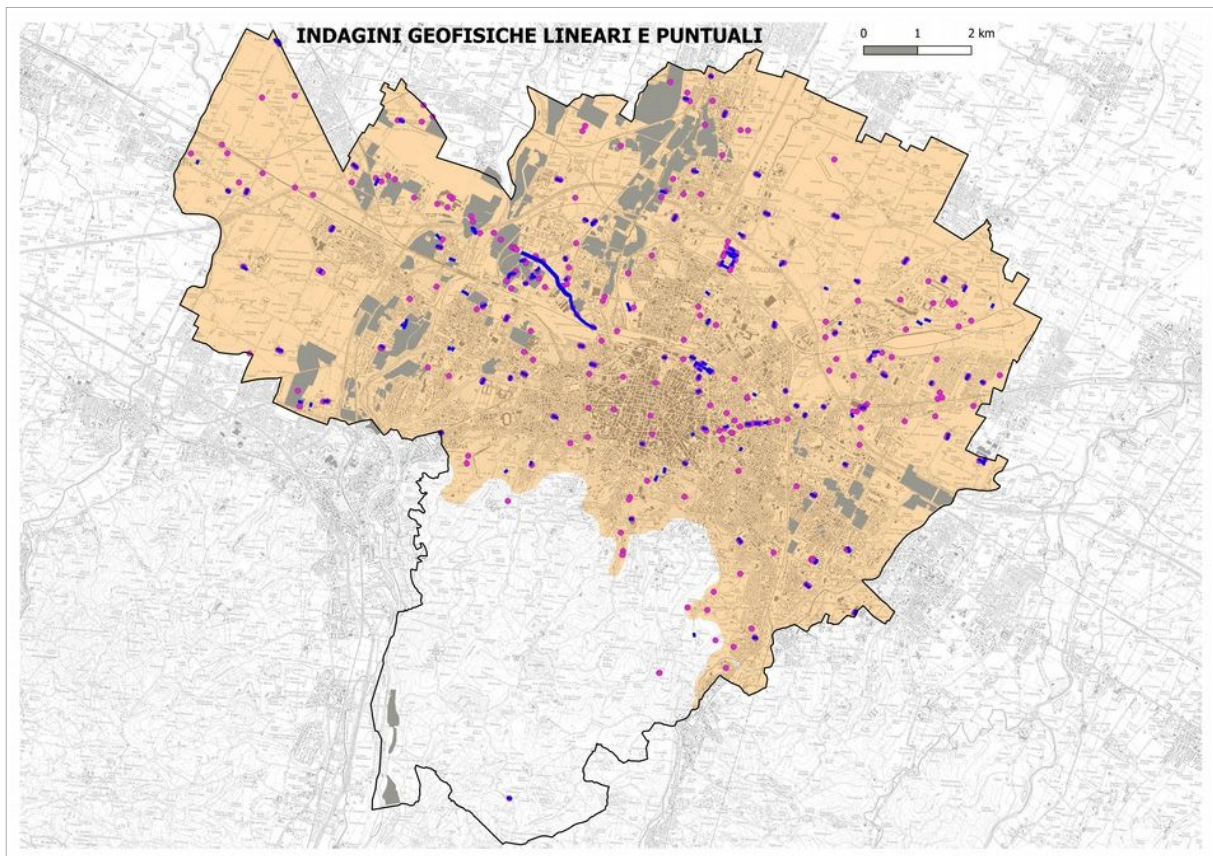


Figura 4.2 - Distribuzione delle indagini geofisiche disponibili per questo studio: lineari (blu) e puntuali (fuxia)

Pur avendo complessivamente una buona copertura di indagini geognostiche/geofisiche, sono state eseguite alcune ulteriori registrazioni microtremori sismici a stazione singola (HVSr) in settori di territorio di particolare complessità, densamente urbanizzati e con scarse informazioni sismostratigrafiche disponibili, come ad esempio nel settore urbanizzato collinare e nella zona di centro storico (foto 4.1).



Foto 4.1 – Alcune registrazioni HVSr eseguite nel centro storico di Bologna per questo studio: basilica di San Francesco; Piazza Maggiore; Piazza Cavour (da sx a dx)

Si è così potuto disporre di 310 misure puntuali di microtremore sismico, per lo più eseguite con tromografo digitale “Tromino” e con disponibili gli esiti spettrali di amplificazione H/V. Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti una delle più importanti cause di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Occorre rammentare che il metodo HVSr considera i microtremori come composti in massima parte da onde di superficie (di Rayleigh) nelle componenti orizzontali e verticali, in grado di essere amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo.

In questo senso, l'analisi delle amplificazioni spettrali H/V ha permesso di ricavare dati sismostratigrafici e informazioni preliminari sulla risposta sismica locale a supporto del presente studio, di particolare utilità per l'individuazione delle MOPS nel territorio di Bologna.

Tra le indagini di repertorio è da segnalare la disponibilità di ben 17 prove sismiche in foro (16 “Down-Hole” e 1 “Cross-Hole”) con esiti diretti di misura delle velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio Vs. Sono inoltre disponibili 187 prove penetrometriche statiche elettriche (CPTU e CPTU) che risultano particolarmente utili per la definizione tessiturale dei sedimenti attraversati e per le prime valutazioni, come vedremo, in merito alla possibilità di liquefazioni dei terreni in caso di evento sismico.

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

In tal senso, per lo studio di microzonazione sismica di Bologna si è potuto disporre di molti punti di controllo, seppure con evidenti concentrazioni in alcune aree, tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere un'attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20÷40 metri di sottosuolo nelle aree interessate dallo studio.

Le conoscenze litostratigrafiche degli areali studiati vengono sintetizzate nella Carta Geologico Tecnica, che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5÷6 metri) e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), che presenta la suddivisione del territorio comunale sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e, in particolare, sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione di campioni prelevati (se disponibili). Si è inoltre deciso di considerare anche gli esiti tessiturali automatici desunti da prove penetrometriche e riportati nei report di prova, sebbene risultino spesso inficiati da errori di interpretazione per quanto riguarda lo spessore dei sedimenti insaturi.

Vengono di seguito illustrati gli elementi di sintesi riguardanti la modellazione di sottosuolo nei settori di pianura e collinare. Ulteriori informazioni sono riportate anche nei successivi capitoli.

5.1 Settore di pianura

Per il territorio di pianura bolognese, il SGSS della Regione Emilia–Romagna ha reso disponibile e pubblicato⁶ disponibili numerose sezioni geologiche profonde (figure 5.1 e 5.2). Questi elaborati sono per lo più derivati da sezioni prodotte a supporto dei fogli geologici in scala 1:50.000 del “Progetto Carta Geologica d'Italia”; sono anche incluse le sezioni elaborate per il “Progetto Riserve Idriche Sotterranee” a e altri progetti minori. Le sezioni riportano indicazioni sulle unità stratigrafiche, sulle litologie e sulle geometrie dei corpi geologici presenti in profondità, fornendo anche una ricostruzione di sintesi degli acquiferi e degli acquitardi più rilevanti della pianura emiliano–romagnola.

Per questo studio, si sono selezionate sette sezioni geologiche dell'archivio (n.10, 46, 49, 111, 112, 121, 123) regionale, inserite in formato pdf nell'“Allegato 1”.

⁶ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/sezioni-geologiche-prove-geognostiche-pianura>

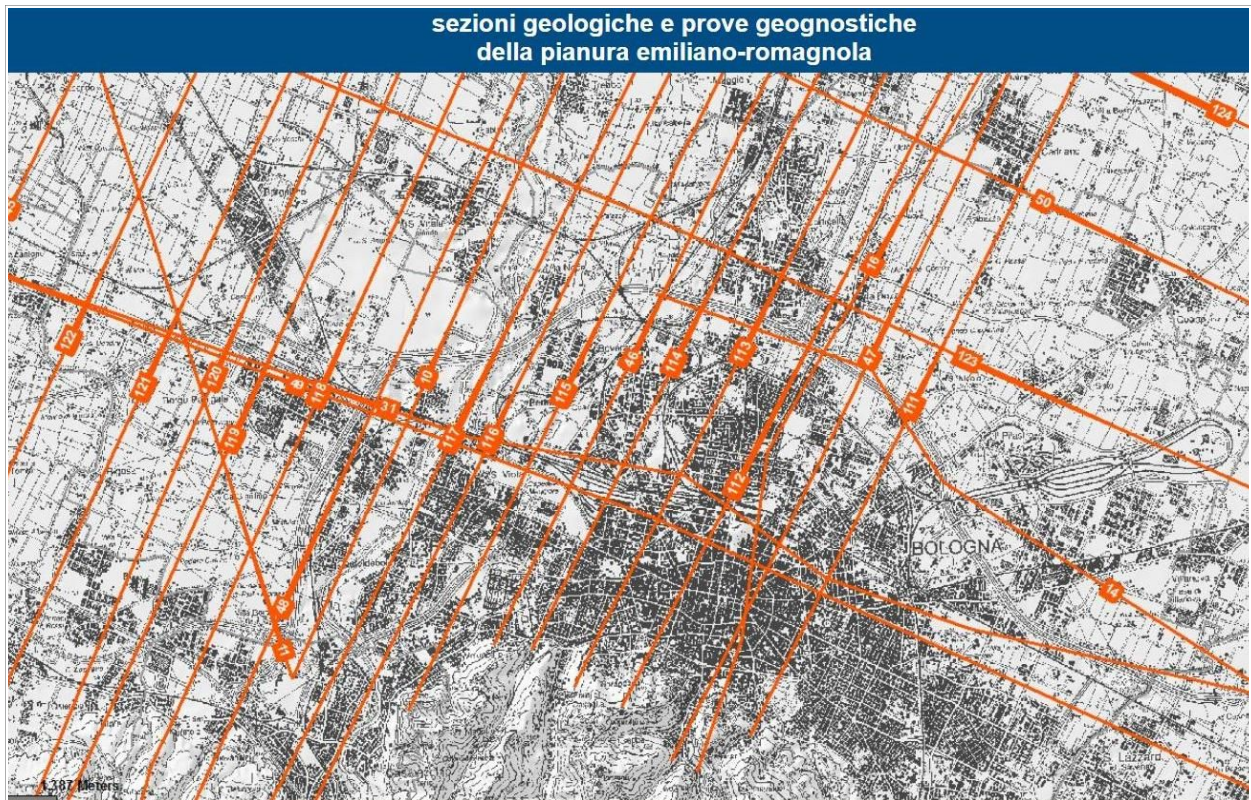


Figura 5.1 - Sezioni geologiche profonde disponibili (fonte: SGSS-RER)

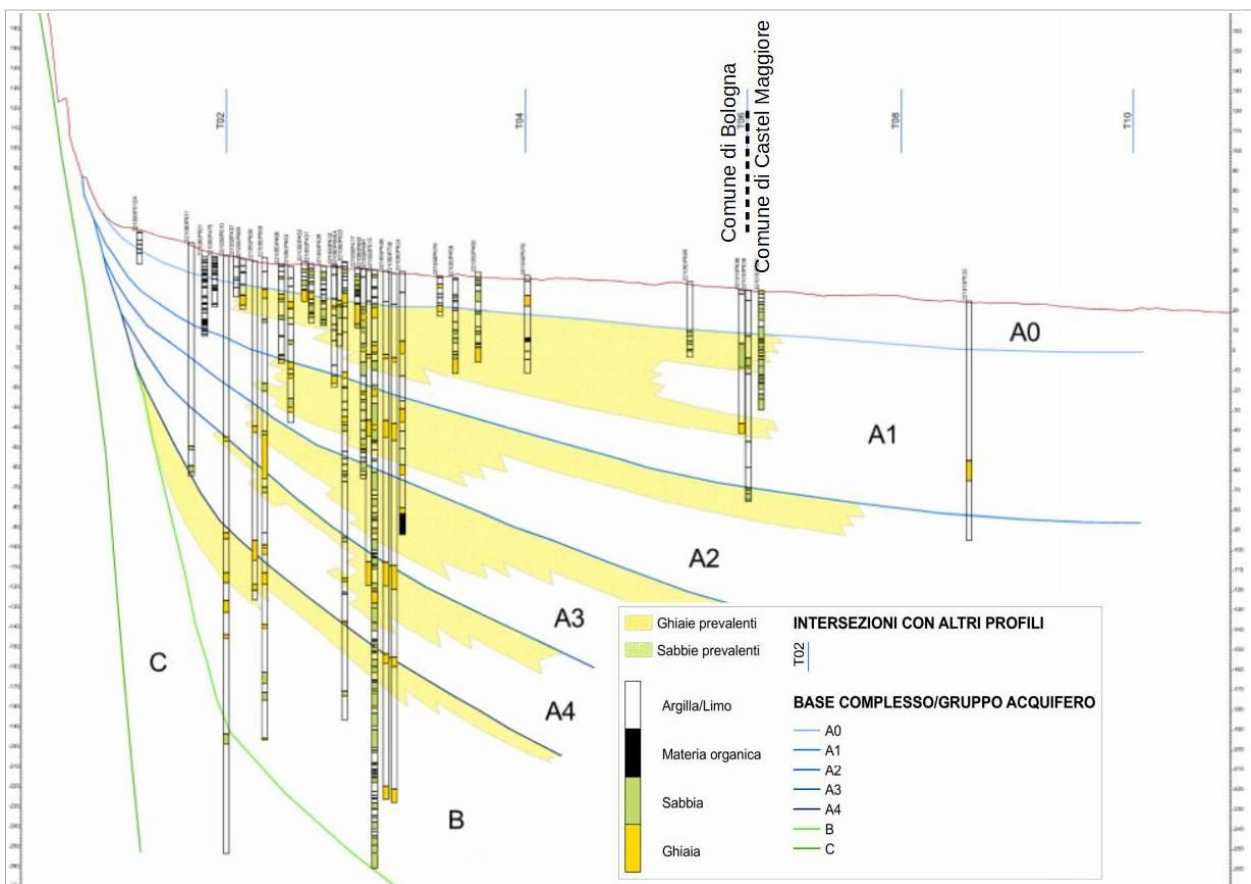


Figura 5.2 - Stralcio sezione geologica n.112 (fonte: SGSS-RER)

Le sezioni geologiche, costruite sulla base dei dati di sottosuolo profondo complessivamente disponibili (RER & ENI-AGIP), evidenziano alternanze di spessori ghiaioso sabbiosi e spessori di depositi più fini, con una netta prevalenza dei primi in prossimità degli sbocchi vallivi del Reno, del Savena e del Lavino (depositi di conoide alluvionale). Gli spessori complessivi dei depositi alluvionali risultano molto variabili dagli sbocchi vallivi (e margine appenninico) verso la bassa pianura; i dati disponibili hanno tuttavia permesso la ricostruzione della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS), costituita dai depositi di età compresa da circa 0,45Ma, che nel territorio comunale raggiunge una profondità di oltre 250 metri nel settore più settentrionale (es. zona “Corticella”) come evidenziato nella figura 5.3.

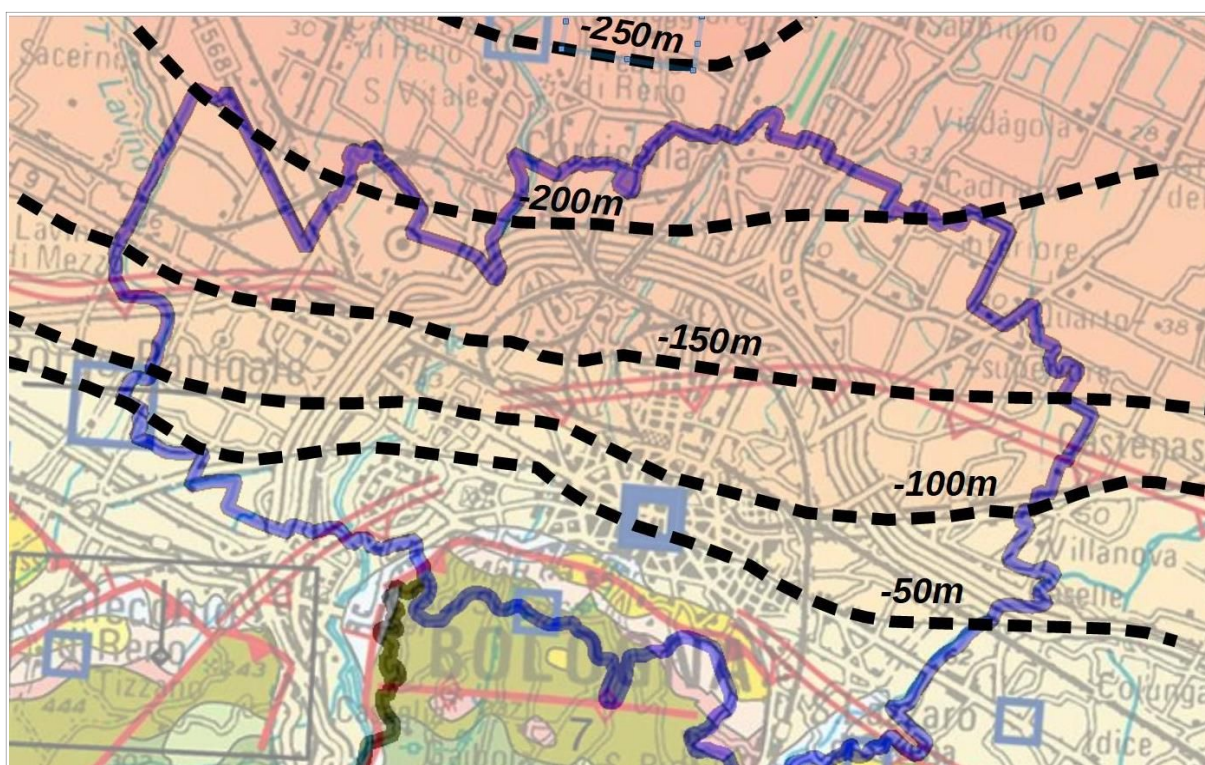


Figura 5.3 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Bologna e rimarcate le isobate della base del Sintema SERS/AES (m s.l.m.)

Dal punto di vista sismico, è necessario rammentare che la prima importante discontinuità stratigrafica (a partire dal piano campagna), in grado di influenzare il moto sismico in superficie in ampi settori di pianura, può essere associata al tetto dei corpi ghiaiosi di conoide alluvionale sepolta. In questo senso, un importante contributo conoscitivo è fornito dalla ricostruzione (tramite isobate riferite al livello medio del mare), prodotta dal SGSS regionale, di alcune delle principali superfici deposizionali di conoide alluvionale sepolta (figura 5.4).

Per questo studio, i dati regionali già disponibili sono stati integrati con gli esiti delle indagini geognostiche/geofisiche messe a disposizione dal Comune di Bologna, permettendo una caratterizzazione sismostratigrafica dei terreni fino a profondità di oltre 30 metri.

Tutte le indagini geognostiche (penetrometrie; sondaggi) disponibili, hanno innanzitutto consentito di controllare e ricostruire la profondità dei depositi ghiaiosi di conoide alluvionale sepolta da depositi prevalentemente fini, come rappresentato in figura 5.5.

Figura 5.4 - Ricostruzione dei corpi grossolani di conoide nel territorio di pianura del Comune di Bologna (fonte: Banca Dati SGSS-RER)

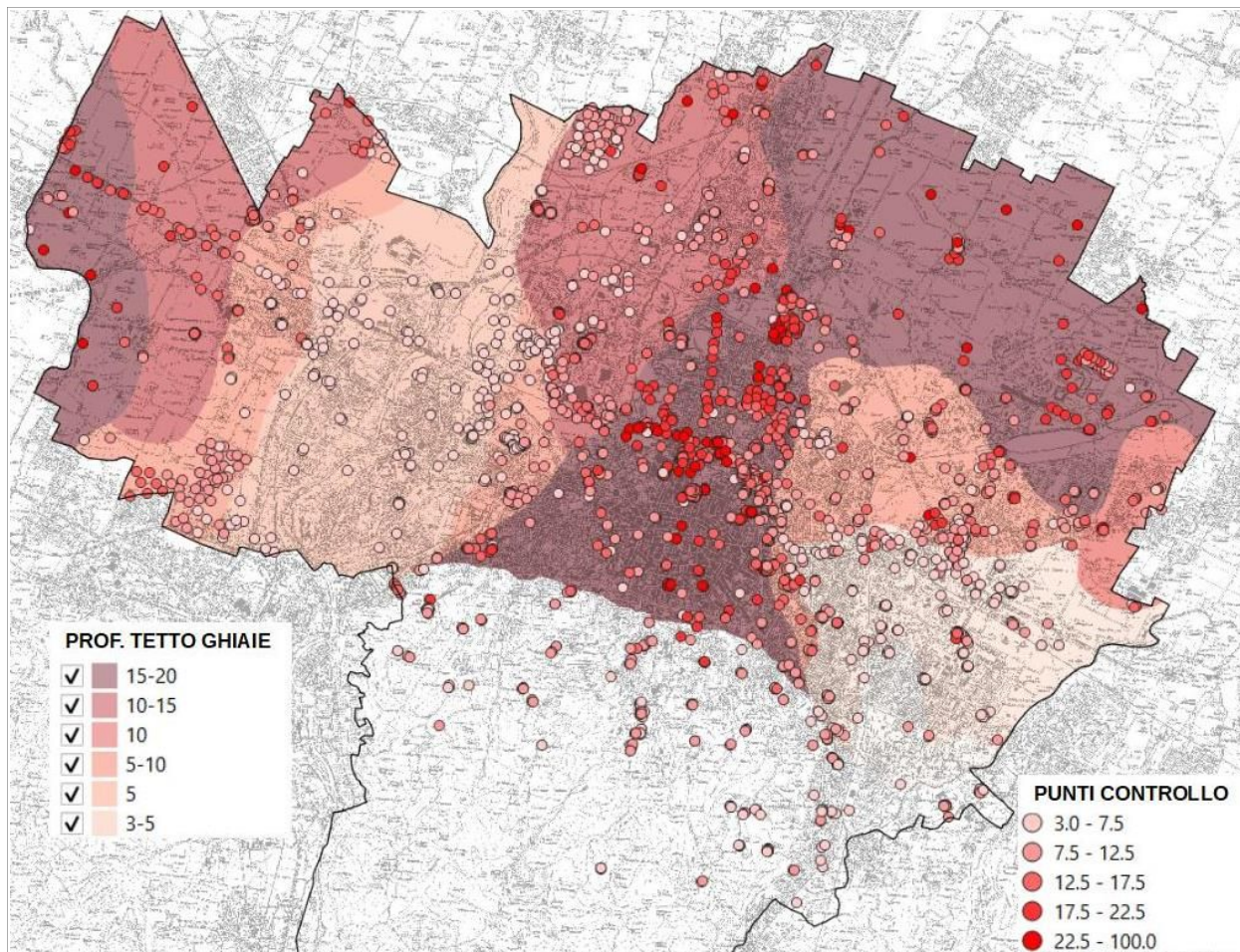
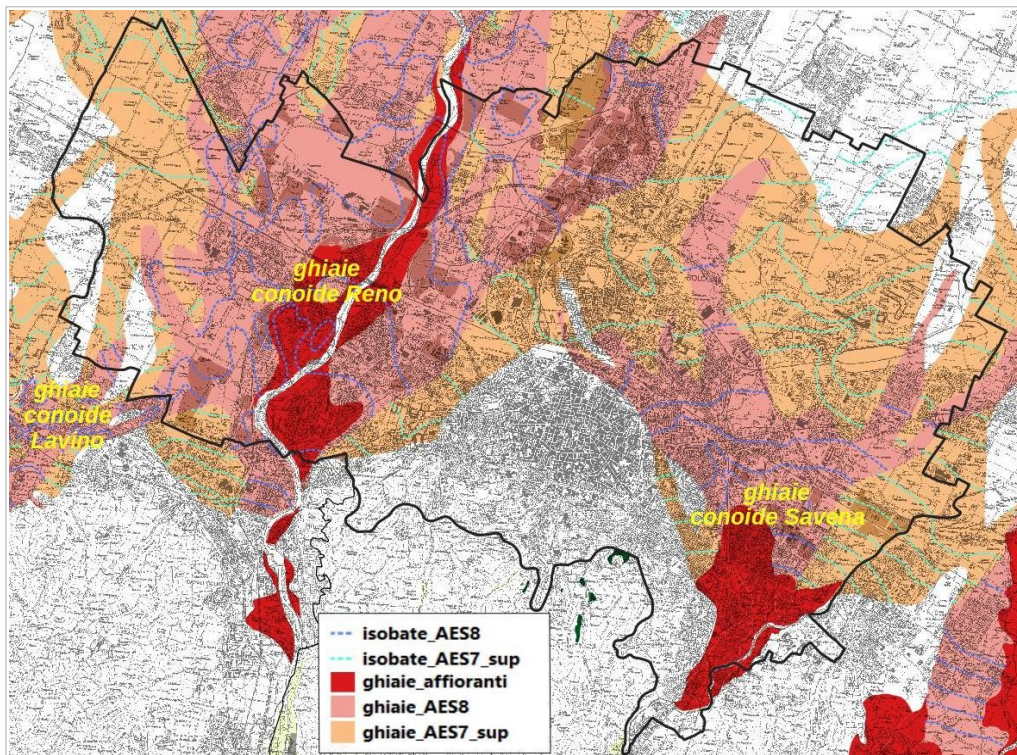


Figura 5.5 - Ricostruzione della profondità del tetto delle ghiaie meno profonde intercettate dalle prove geognostiche disponibili (sondaggi e penetrometrie)

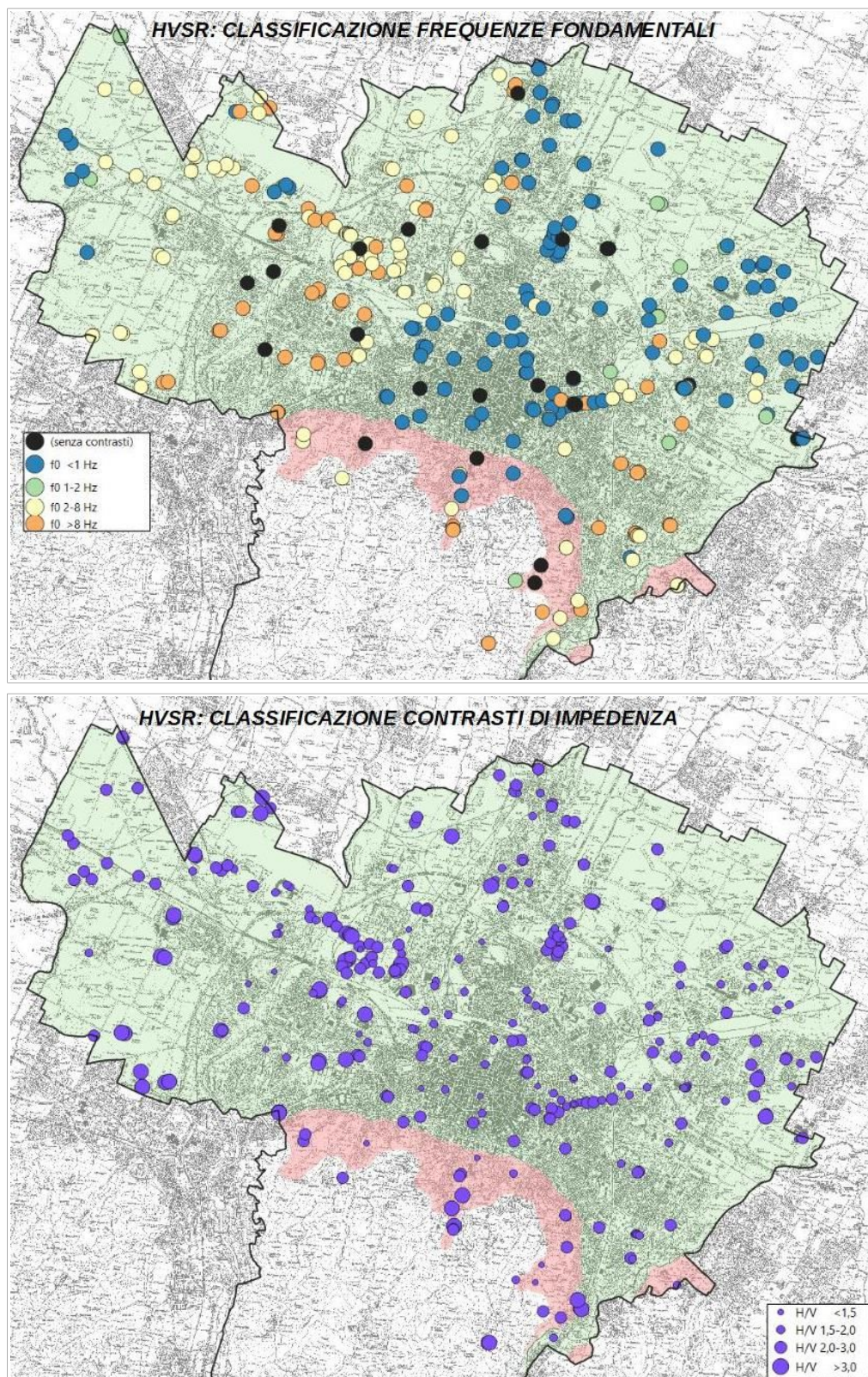


Figura 5.6 -
Classificazione
delle
registrazioni
sismiche HVSr
disponibili: in
alto classi di
frequenza di
risonanza; in
basso classi di
massima
ampiezza
spettrale H/V

Come già descritto (cfr. capitolo 4), le numerose registrazioni HVSr disponibili hanno permesso identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo (figura 5.6). Si rammenta che massimi contrasti di impedenza misurati dallo strumento tomografico sono associabili a riflettori sismici e che, nel territorio di pianura bolognese, tali riflettori possono coincidere con il tetto delle ghiaie di coniole sepolte.

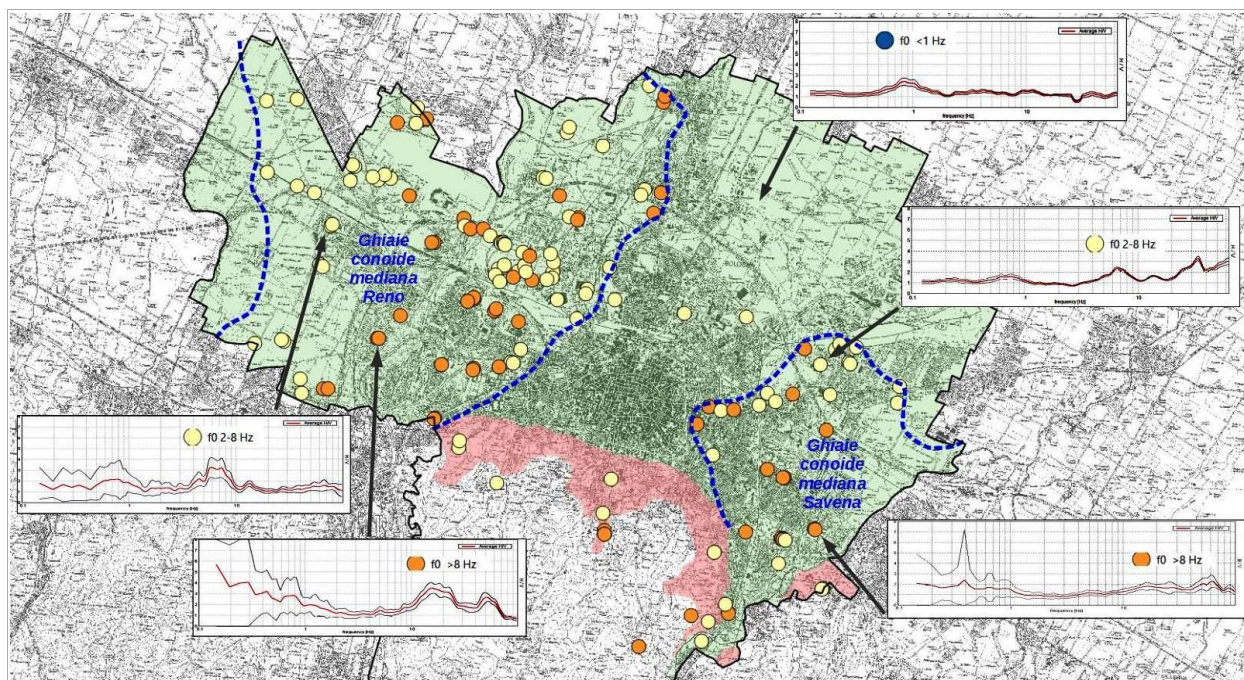


Figura 5.7 - La figura evidenzia la concentrazione delle registrazioni sismiche HVSR con frequenze di risonanza fondamentali medio alte ($f_0 > 2$ hz)

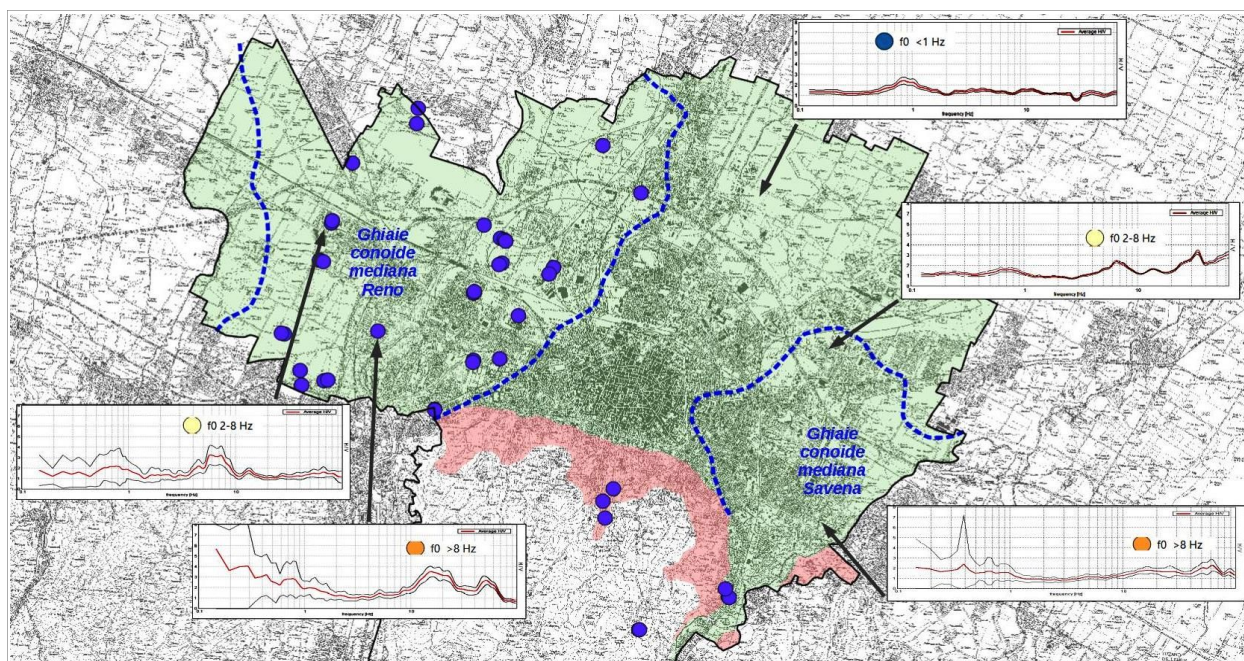


Figura 5.8 - La figura evidenzia la concentrazione delle registrazioni sismiche HVSR con contrasti di impedenza elevati ($H/V > 3$). Nel settore di collina, le prove HVSR con elevati contrasti sono state su terreni di copertura sovrastanti substrato roccioso relativamente rigido (PAT e GES)

L'analisi delle registrazioni HVSR e in particolare degli esiti spettrali H/V (frequenze fondamentali F_0 e massime intensità degli alti spettrali), come schematizzato nelle figure 5.7 e 5.8, rilevano areali caratterizzati da risposta sismica locale molto differenziata. In particolare si possono distinguere:

- ✓ areali caratterizzati da frequenze di risonanza fondamentali medio-alte ($f_0 > 2$ Hz). Tali esiti, sono generalmente correlabili alla presenza di riflettori sismici situati fino a circa 30 metri

di profondità. Questi risultati sono ottenuti in numerose registrazioni effettuate nel settore di conoide mediana del Reno e del Savena. In questo senso la figura 5.7 evidenzia tutte le prove HVSR con massime amplificazioni a frequenze medio alte ($f_0 > 2$ Hz). Simili risultati sono ricavati anche in registrazioni effettuate in alcuni areali del settore collinare e in questo caso le amplificazioni spettrali sono correlabili a riflettori sismici alla base delle coperture più “soffici” (depositi di versante; alluvioni di fondovalle). In alcuni casi, sono state registrate massime amplificazioni a frequenze medio alte anche in presenza di substrato marino affiorante ma caratterizzato da uno spessore più superficiale molto alterato;

- ✓ areali caratterizzati da frequenze di risonanza fondamentali basse ($f_0 > 2$ Hz). Questi risultati sono correlabili a riflettori sismici situati a profondità generalmente maggiori di 30 metri. Si tratta di misure effettuate prevalentemente nei settori NE e Ovest del territorio comunale. L'assenza di amplificazioni a frequenze medio-alte è legata all'assenza di orizzonti ghiaiosi poco profondi. Simile condizione si riscontra anche nel settore di “interconoide” Reno-Savena (all'incirca coincidente con il centro storico del Capoluogo e con la zona urbane “Bolognina”) ma anche in areali attribuibili alla porzione distale della conoide del Savena e del Lavino (intervalli ghiaiosi di modesto spessore, poco consolidati e con matrice limoso sabbiosa più abbondante)
- ✓ areali caratterizzati da contrasti di impedenza più elevati (anche $H/V > 3$), come evidenziato nella figura 5.4. Questi esiti sono stati ottenuti in numerose registrazioni HVSR eseguite nel settore di conoide recente del fiume Reno. Questi areali sono caratterizzati da orizzonti ghiaiosi poco profondi (a partire da $-10 \div 15$ metri) a tessiture più grossolane e anche ben consolidati e con buon grado di rigidità (figura 5.9), come si è appurato dalle ulteriori indagini geofisiche disponibili (ghiaie caratterizzate da V_s fino a $400 \div 450$ m/s). Simili risultati sono ricavati in alcune registrazioni HVSR eseguite nel settore di collina e in particolare in aree caratterizzate da coperture quaternarie sovrastanti bedrock marino discretamente rigido come i Gessi e la Formazione di Pantano ($V_s > 500$ m/s).

È interessante segnalare come le prove HVSR effettuate nel settore di conoide mediana del Savena, abbiano per lo più registrato frequenze fondamentali medio-alte (con orizzonti ghiaioso sabbiosi già attraversati a $-5 \div 10$ metri di profondità), tuttavia i contrasti di impedenza risultano più moderati (figure 5.6 e 5.7) rispetto al rispettivo settore di conoide mediana attribuibile al fiume Reno. Ciò è evidentemente correlabile alla presenza di depositi grossolani meno consolidati, meno grossolani e conseguentemente rigidi. In questo senso, indagini geofisiche disponibili riscontrano per le ghiaie sabbiose del Savena V_s di circa $300 \div 350$ m/s (figura 5.10).

Nelle parti di pianura caratterizzato da successioni di depositi prevalentemente fini (interconoide Reno-Savena; territorio comunale NE e Ovest) le indagini geofisiche hanno riscontrato V_s equivalenti (V_{s30}) comprese tra circa 250 m/s e 200 m/s.

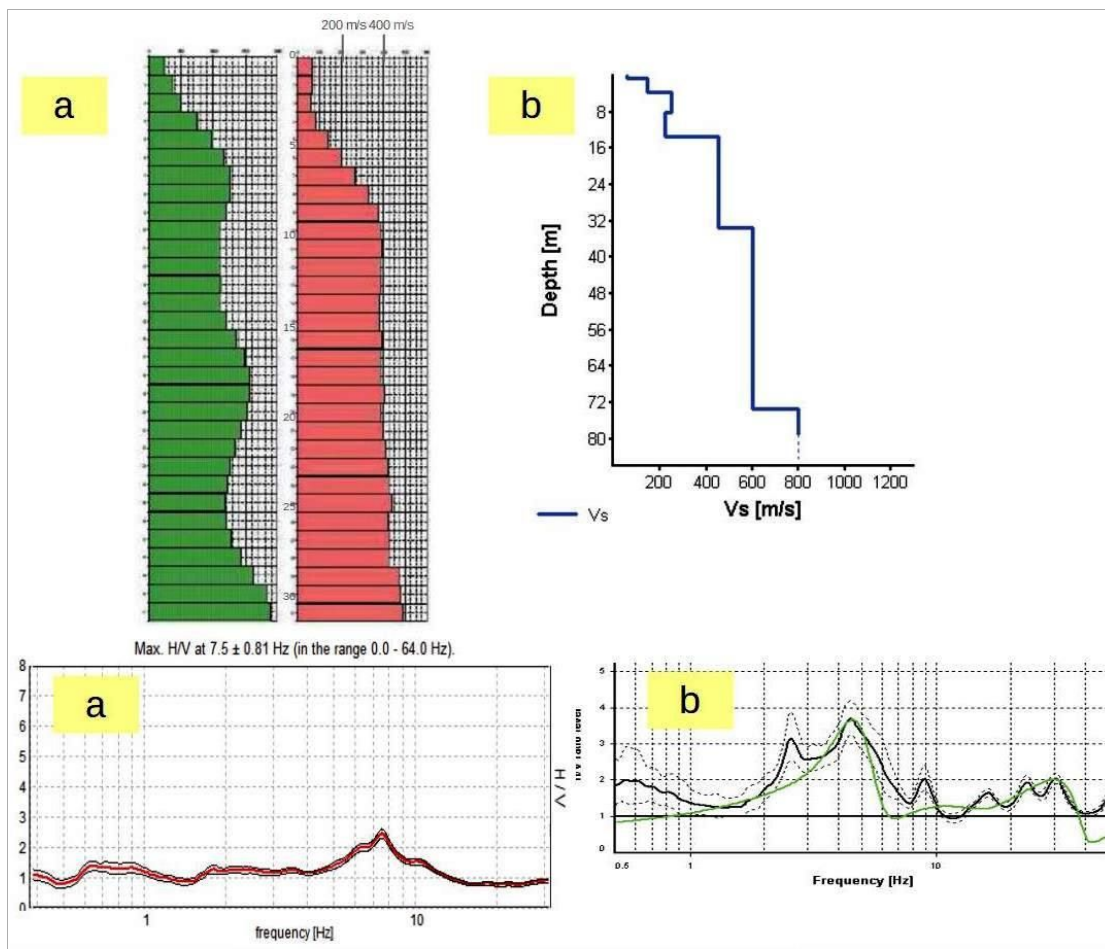
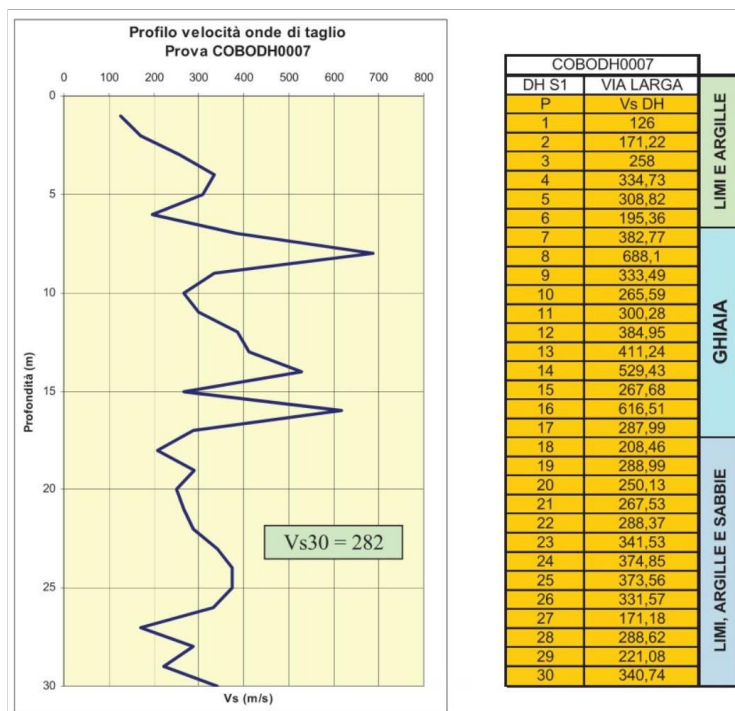


Figura 5.9 – Modelli sismostratigrafici ricavati da prove geofisiche: a) Down-Hole e HVSR eseguite in zona Bertalia. b) HVSR eseguita presso Borgo Panigale

Figura 5.10 – Modello sismostratigrafico ricavato da prova Down-Hole eseguita in zona “via Larga”



Nel settore di pianura, le indagini hanno inoltre consentito il controllo di intervalli granulari liquefacibili fino a 20 metri di profondità. Si tratta di un'analisi di carattere esclusivamente qualitativo, basato sul controllo tessiturale. La descrizione del metodo di controllo e gli esiti sono riportati nel successivo capitolo 6.

5.2 Settore di collina

Il modello di sottosuolo del settore collina è ricostruito analizzando anche in questo caso i dati di tutte le indagini di repertorio disponibili e i successivi dati ricavati dalle misure di microtremore a stazione singola (HVSR) realizzate per tale lavoro. Ci si è basato anche su quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia–Romagna alla scala 1:10.000, in particolare per la redazione della carta geologico–tecnica.

In generale, la litostratigrafia del sottosuolo desunta dalle indagini conferma l'assetto descritto nell'inquadramento, riportato nel capitolo 3. La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri) e la carta delle MOPS presenta la suddivisione del territorio studiato sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica nei primi 30 metri circa, schematizzando le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio. In sintesi, gli areali studiati sono caratterizzati dalla presenza in superficie di:

- substrato roccioso affiorante/subaffiorante, prevalentemente costituito da marne argillose e/o siltose (Formazione di Cigarello CIG; Formazione del Termina TER; Argille Azzurre FAA) e da sabbie e areniti poco cementate (Sabbie di Imola IMO).
In alcune limitate aree sono affioranti depositi più competenti (prevalentemente areniti alternate a peliti marnose), attribuibili alla Formazione di Pantano PAT (affioranti ad esempio nei rilievi presso San Luca; inoltre rappresentano il substrato in parte del fondovalle Aposa a sud di San Mamolo) e ai depositi messiniani evaporitici GES (substrato in parte del fondovalle Savena e affioranti nel suo versante prospiciente; Monte Donato);
- depositi alluvionali prevalentemente ghiaioso sabbiosi lungo i corsi fluviali principali (Savena; Aposa; Ravone);
- depositi alluvionali terrazzati a granulometria variabile dalle ghiaie sabbiose alle sabbie limose, fino alle argille limose (AES; AES5; AES6, AES7, AES8 e AES8a);
- depositi eluvio–colluviali e di versante lungo i versanti e ai piedi degli stessi;
- depositi di frana attivi o quiescenti (prevalentemente per scivolamento e/o colamento).

Per quanto riguarda il substrato, si tratta di bedrock sismici “non rigidi”, spesso caratterizzati da alterazione, anche legata a stress di natura tettonica (cfr. paragrafo 3.2). Nei depositi marini prevalentemente pelitici (CIG; TER; FAA) e nelle Sabbie Gialle, le indagini disponibili hanno spesso evidenziato fronti superficiali scarsamente consistenti, con prove penetrometriche che hanno facilmente raggiunto profondità d'investigazione di oltre 15–20 metri. In queste categorie di substrato, le indagini sismiche hanno inoltre riscontrato esiti di velocità di taglio (V_s) molto basse, con V_{s30} comprese tra poco meno di 250 m/s e 350 m/s (figura 5.11).

Velocità di taglio più elevate, tuttavia da attribuire ancora a bedrock “non rigido”, sono invece ricavate nei depositi messiniani gessosi e in particolare nei depositi arenitici della Formazione di Pantano, con valori massimi di Vs30 fino a poco oltre 500 m/s (figura 5.12).

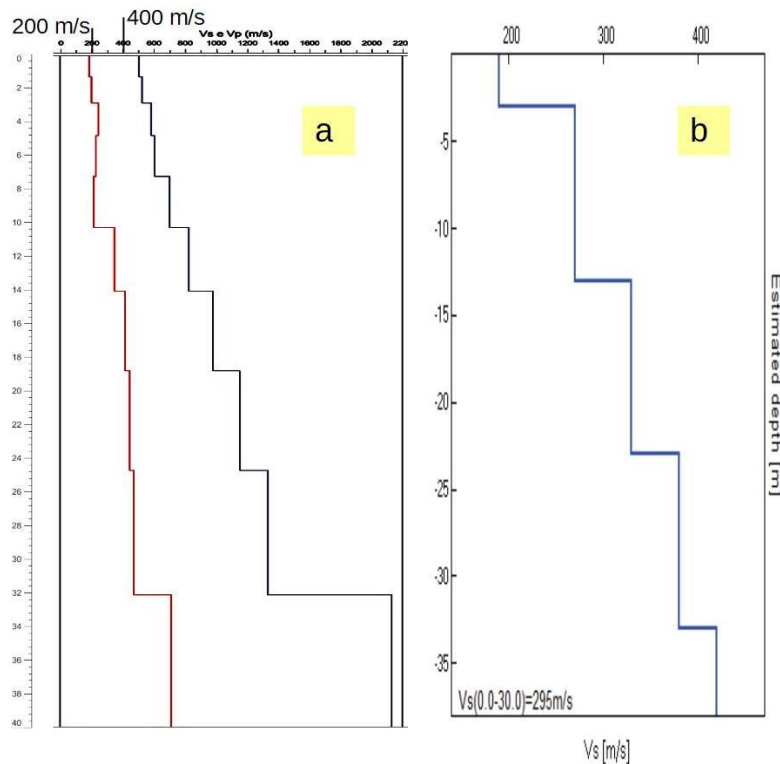


Figura 5.11 - Modelli sismostratigrafici ricavati da prove geofisiche nel settore di collina: a) MASW eseguita nel fondovalle Ravone a sud di Villa Spada”(bedrock marino FAA) b) MASW eseguita presso il “Seminario regionale” (bedrock marino TER)

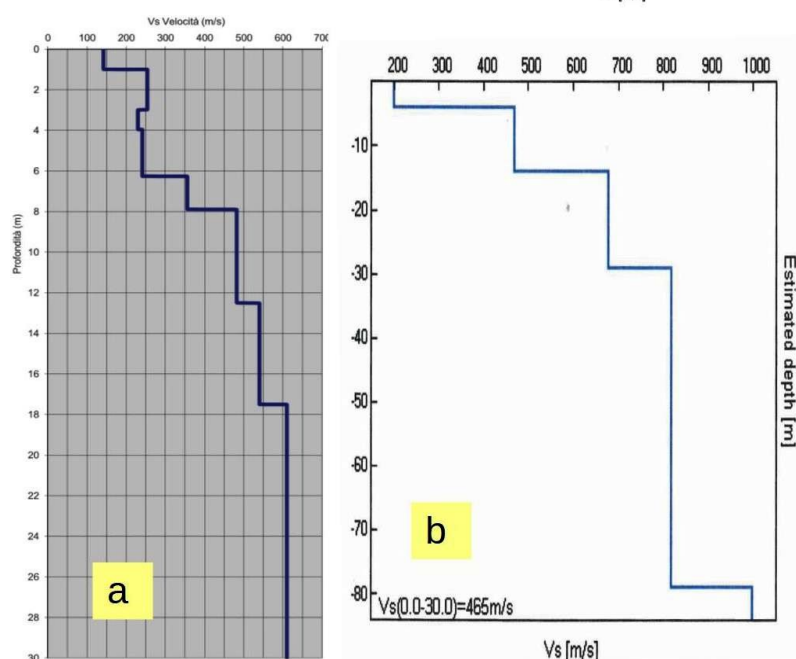
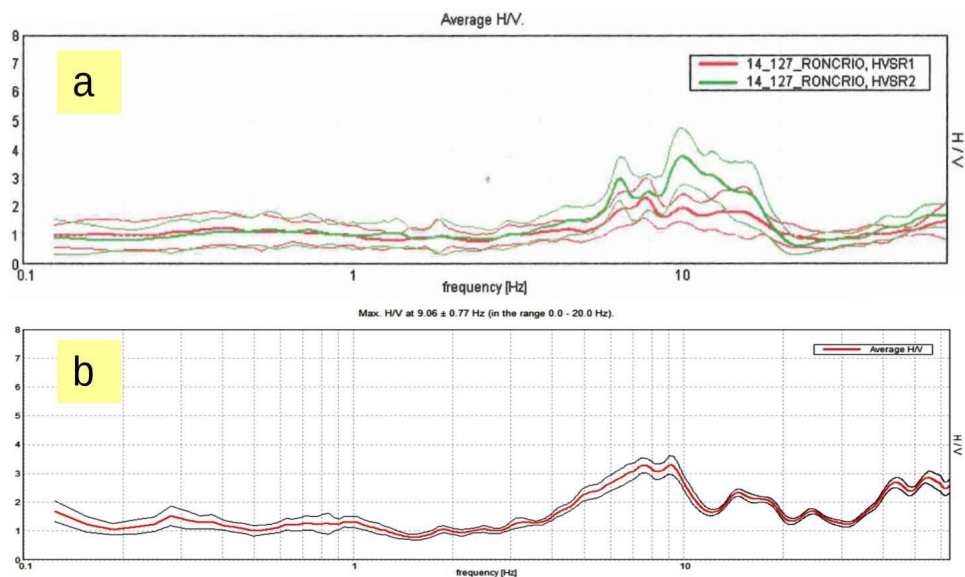


Figura 5.12 - Modelli sismostratigrafici ricavati da prove geofisiche nel settore di collina: a) MASW eseguita nel fondovalle Savena (bedrock marino GES con coperture alluvionali fino a circa -8 metri) b) HVSR eseguita nel fondovalle Aposa a sud di San Mamolo con coperture alluvionali fino a 4 metri (bedrock marino PAT)

Le indagini disponibili hanno inoltre permesso di stimare gli spessori dei depositi di copertura quaternari che sovrastano il substrato marino. In particolare, le registrazioni HVSR hanno permesso di accertare la presenza o l'assenza di contrasti di impedenza nei terreni indagati, consentendo la determinazione di modelli sismostratigrafici che prevedono, appunto coltri di copertura su bedrock. Le misurazioni HVSR, correlate con dati stratigrafici e misure di Vs,

hanno infatti spesso consentito di associare i picchi principali di H/V alla profondità del contatto tra i depositi terrazzati e di versante con il substrato, in genere sempre alterato nei primi metri. Come già descritto nel precedente paragrafo, alcune registrazioni HVSR hanno evidenziato amplificazioni spettrali a frequenze medio-alte ($f_0 > 2$ Hz), piuttosto pronunciati, direttamente legata alla differenza di velocità degli strati, in aree caratterizzate da coperture quaternarie sovrastanti bedrock marino discretamente rigido come i Gessi e la Formazione di Pantano (figura 5.13).

Figura 5.13 - Spettri H/V ottenuti da registrazioni eseguite in aree con substrato marino PAT (a) e GES (b) in entrambi i casi con coperture alluvionali (fondovalle rispettivamente dell'Aposa e del Savena)



6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

6.1 Commenti introduttivi

I dati geognostici considerati offrono una sufficiente “copertura” conoscitiva delle aree studiate e le indagini geofisiche espletate ex novo per questo studio di microzonazione (registrazioni HVSR) consentono una modellazione del sottosuolo esaustiva per l'elaborazione della risposta sismica locale semplificata (secondo livello).

Le incertezze sono comunque accettabili in funzione del grado di approfondimento che si è inteso espletare. Lo studio, ha inoltre ben definito le aree che dovranno ineludibilmente approfondire gli aspetti di pericolosità sismica.

Nei successivi paragrafi si introducono le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando di valutare anche le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili in questo livello di approfondimento.

6.2 Valutazioni sulla liquefacibilità

L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine “liquefazione” si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente, $M > 5.5$) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni “non drenate” durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e della sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15–20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati durante gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni); anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni⁷. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di microzonazione sismica di Bologna ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove penetrometriche). In questo senso, si è potuto disporre di vari dati tessiturali diretti, ricavati da sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti di Atterberg; prove di taglio; ecc.), in numero tuttavia non esaustivo per effettuare una valutazione a una scala territoriale. Si sono pertanto considerati gli esiti delle prove penetrometriche CPT e CPTU/CPTU disponibili. In particolar modo si dispone di 176 prove CPTU/CPTU, prevalentemente realizzate negli ultimi 7÷8 anni anche in zone densamente urbanizzate. Si rammenta che le prove penetrometriche elettriche consentono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alle altre tipologie di penetrometrie statiche o dinamiche in quanto restituiscono diagrammi litotecnici molto più definiti (letture delle resistenze alla penetrazione fino a 1 cm/avanzamento). In conclusione, si sono complessivamente controllati 306 indagini geognostiche punti che raggiungono almeno 10 metri di profondità.

Per analizzare la potenziale suscettibilità alla liquefazione si è deciso di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, in quanto tale intervallo è generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con conseguenze più gravi in termini di possibilità manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di possibile interazione con le fondazioni dirette (le più diffuse) di manufatti.

PROFONDITA'	CLASSI SUSCETTIBILITA'
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri

Tabella 6.1

Le prove geognostiche (figura 6.1), sono state classificate basandosi sul principio metodologico già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica⁸ nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio e giugno 2012. Il controllo delle indagini permettono di distinguere le classi tessiturali riportate nella tabella 6.1.

⁷ Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

⁸ Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell'Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).

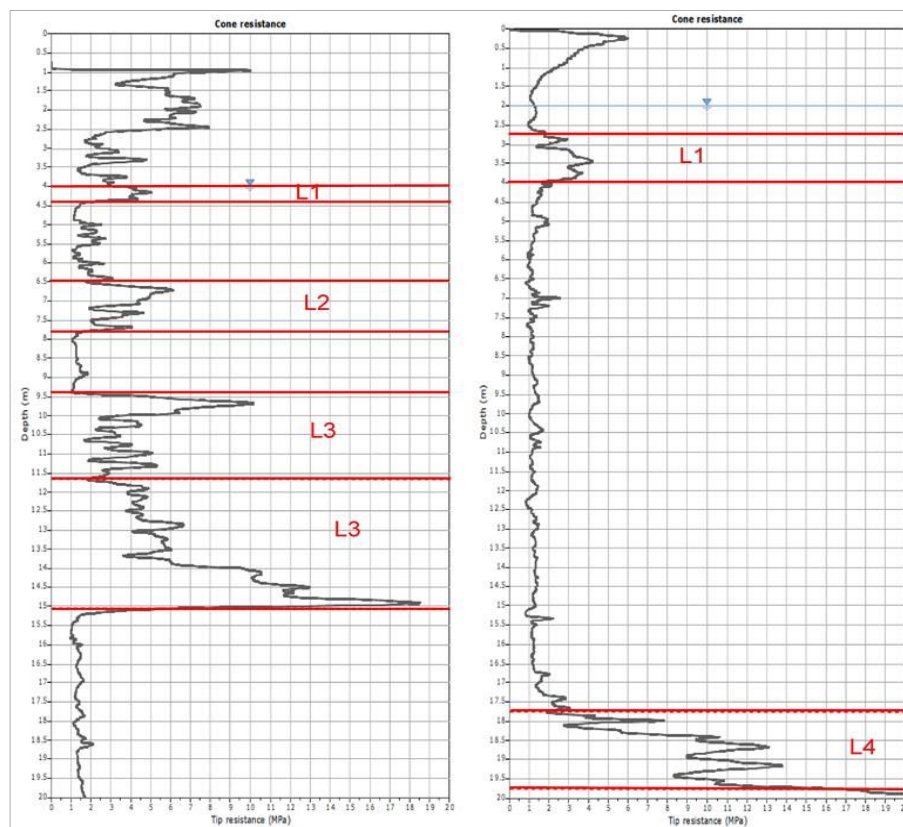


Figura 6.1 – Esempi di interpretazione dei diagrammi di prove CPT e CPTU per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione

Per questo studio, si è inoltre considerato il contesto idrogeologico locale desunto dal quadro conoscitivo del PSC di Bologna (cfr. paragrafo 3.4); inoltre, nelle prove di controllo, sono state esaminate anche le quote d'acqua rilevate all'epoca dell'esecuzione e in particolar modo il controllo ha interessato le terebrazioni più recenti. Da questo controllo non sono tuttavia emerse particolari variabilità rispetto ai dati di oltre 20 anni. Si evidenzia la discreta soggiacenza (>4 metri) che interessa tutto il settore meridionale dell'abitato e in particolare le zone “Centro”, “Murri”, “Saffi”, “Barca”, “Santa Viola” presumibilmente riconducibile alla scarsità di acquiferi granulari superficiali e all'impossibilità di “ricarica” superficiale indotta dal forte contesto di impermeabilizzazione dell'urbanizzato.

La figura 6.1 riporta una sintesi della classificazione dei punti di controllo dell'intero territorio comunale, relativamente alla presenza di intervalli “L1” e “L2” nei primi 10 metri di sottosuolo (profondità che risulta comprendere la maggior parte dei “volumi significativi” di terreni per gli edifici).

L'analisi delle indagini disponibili ha consentito di delimitare con maggiore accuratezza le zone caratterizzate da involuppi di paleoalvei recenti e di “crevasse” attribuibili al Savena (settore NE del Comune), al Reno (settore nord) al Lavino (settore orientale). Nel settore centrale del territorio comunale pianeggiante (zona “Bolognina”) sono infine riscontrati corpi sabbiosi saturi attribuibili ad alcuni paleoalvei dei corsi d'acqua secondari Aposa e Ravone.

Il confronto tra esiti tessiturali e il contesto idrogeologico locale ha quindi consentito di delimitare le “zona di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v. 4.1).

Occorre precisare che per le zone di potenziale propensione al fenomeno della liquefazione dovranno essere eseguiti ulteriori approfondimenti per accertare le effettive condizioni di pericolosità. Gli approfondimenti dovranno quantificare con gli opportuni metodi (cfr. Allegato A3 DGR 630/21019) il potenziale di liquefazione locale, necessario per le valutazioni sul rischio per i manufatti esistenti e di previsione.

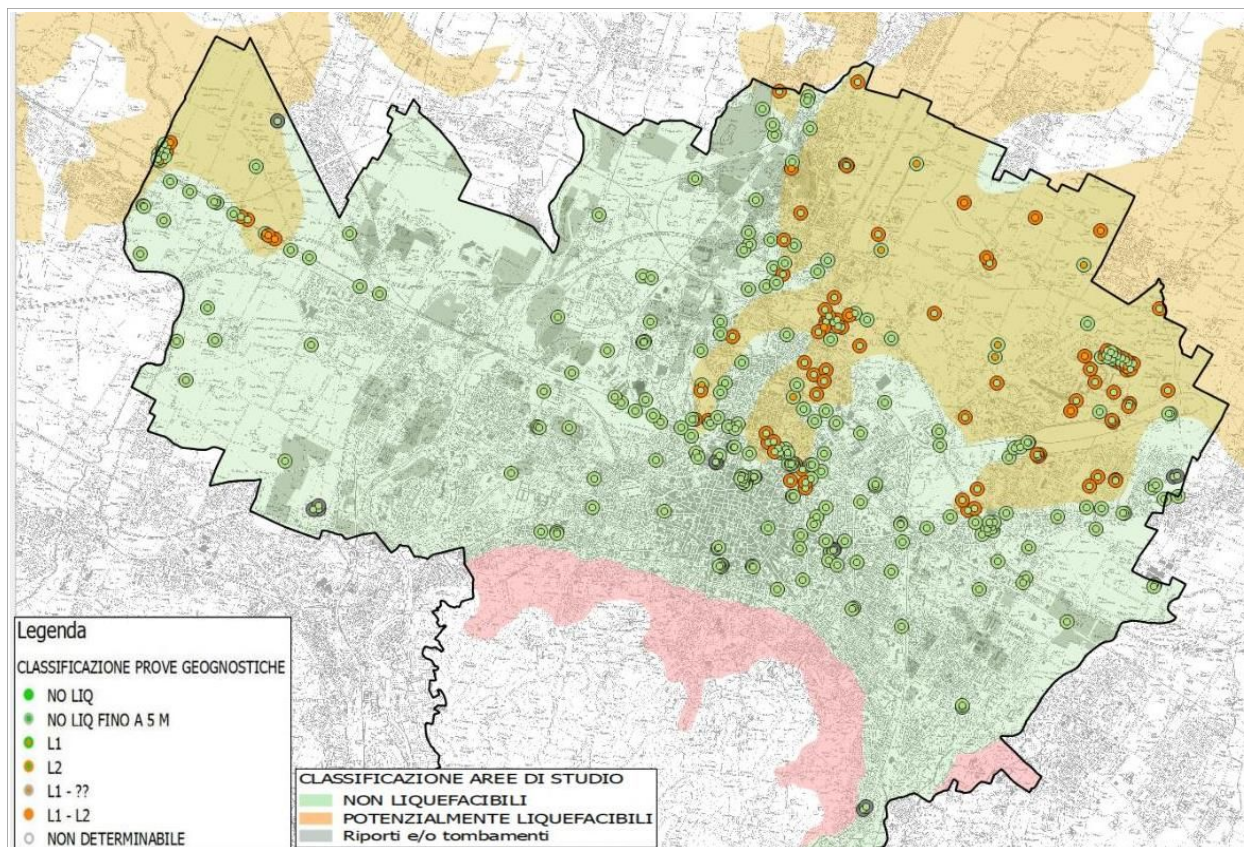


Figura 6.2 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità in base alla presenza di strati granulari in falda

6.3 Aree con cavità sepolte

Nel territorio urbano del Capoluogo si sono delimitati le principali “cavità sepolte” di natura antropica, descritte nel paragrafo 3.5 (Canali tombati; Stazione AV; parcheggi interrati multipiano). Tali elementi sono riportati nella cartografia MOPS come forme sepolte. A tali aree non si forniscono particolari condizioni di attenzione, tuttavia si vuole evidenziare la presenza di questi elementi quale dato conoscitivo ai fini delle analisi di rischio sismico a supporto di eventuali studi urbanistici e/o di progettazione in areali limitrofi.

6.4 Definizione del substrato rigido

Tra gli obiettivi degli approfondimenti espletati, vi è stato, innanzitutto, quello di definire con maggior dettaglio il bedrock sismico di riferimento per le modellazioni numeriche di RSL.

Per quanto riguarda il contesto di pianura, occorre premettere che le indagini eseguite per gli studi di microzonazione sismica nei Comuni maggiormente danneggiati dal sisma emiliano del

2012 (ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012) hanno offerto un importante contributo conoscitivo per quanto riguarda la risposta sismica nella pianura padana.

Gli studi regionali hanno riscontrato come il primo forte contrasto di impedenza sia collocabile nei depositi alluvionali, in genere tra la base del subsistema AES6 e la più profonda base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore AES (cfr paragrafo 3.1). Una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino. Tuttavia, le numerose registrazioni HVSR eseguite nella Pianura Padana indicano che gli effetti di amplificazione legati a quest'ultimo riflettore sismico possono risultare molto variabili in funzione sia della sua profondità, sia delle caratteristiche litologiche/sismostratigrafiche dello spessore alluvionale e del substrato marino. In tal senso, un'ampia bibliografia scientifica (es. Seed et al., 1975) evidenzia che, per elevati spessori (in genere maggiori di 100 metri) di depositi "soffici" alluvionali, si possono riscontrare importanti effetti di smorzamento.

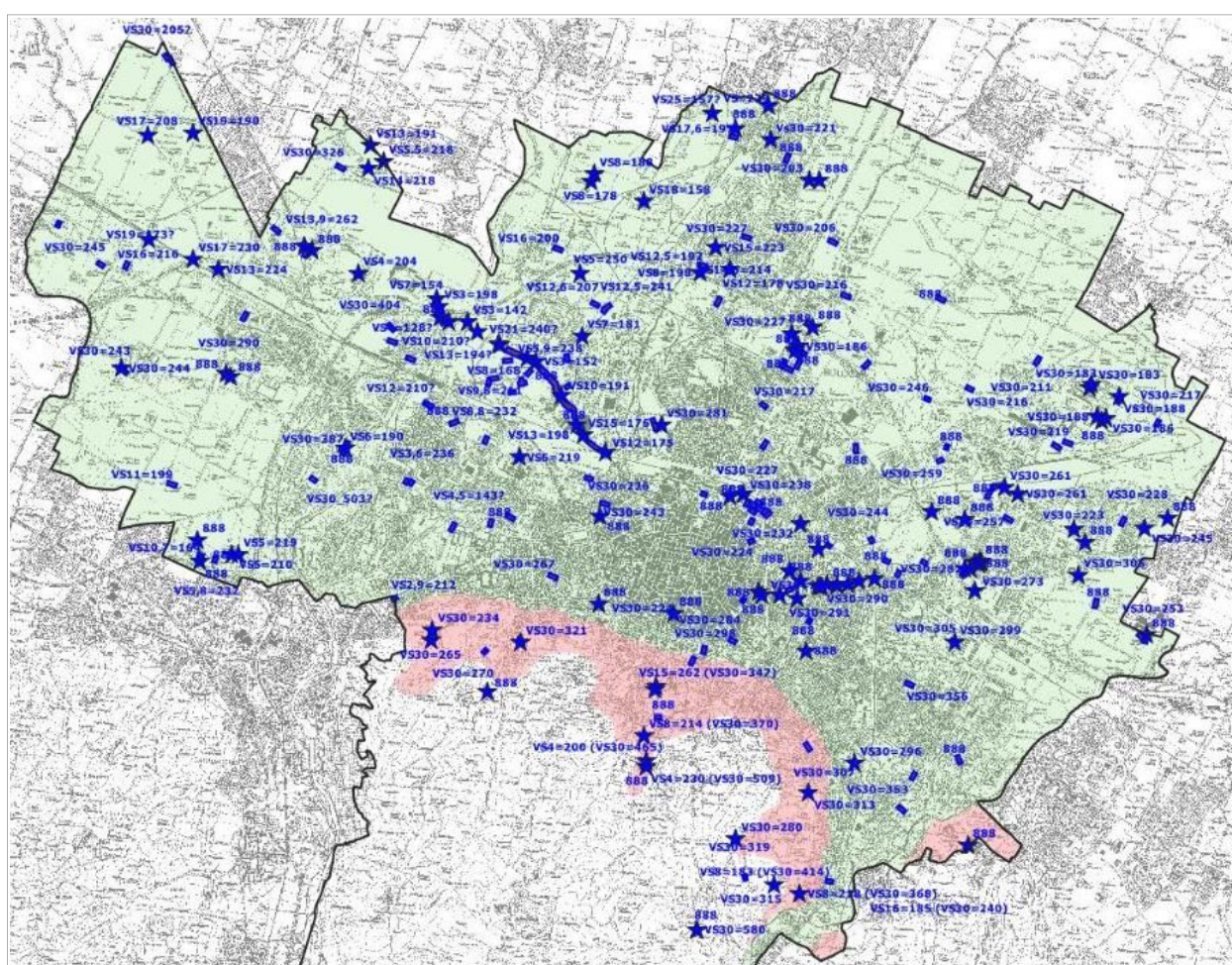


Figura 6.3 - Dati sismostratigrafici disponibili desunti da prove lineari e puntuali

Dal punto di vista sismico, una prima importante discontinuità stratigrafica (a partire dal piano campagna), in grado di influenzare il moto sismico in superficie in ampi settori di pianura, può essere associata al tetto dei corpi ghiaiosi di conoide alluvionale sepolta.

Per il territorio di Bologna, le informazioni di sottosuolo profonde disponibili (sezioni geologiche; sondaggi RER; ecc.) sono stati confrontati con le informazioni sismostratigrafiche desunte dalle indagini geofisiche (figura 6.3) e con gli esiti delle registrazioni HVSR, per interpretare modelli sismostratigrafici il più possibile rappresentativi del contesto locale.

Come già scritto nel paragrafo 5.1, in estesi settori attribuibili al contesto deposizionale di conoide, gli orizzonti grossolani presenti a diverse profondità danno origine a contrasti di impedenza registrate a frequenza medio alte; in alcuni casi (es. conoide Reno) tali contrasti evidenziano amplificazioni spettrali anche elevate in corrispondenza del tetto delle ghiaie più consolidate (Vs fino a 400÷450 m/s) .

Negli areali di pianura situati più a NE (verso i confini amministrativi di Castel Maggiore e Granarolo) e verso occidente le frequenze fondamentali risultano molto spesso inferiori a 1 Hz a dimostrazione che i principali riflettori sismici si collocano a profondità superiori a 100 m dal p.c. In questi casi, le frequenze di risonanza fondamentali sembrano dunque correlabili a spessori di sedimenti più grossolani e/o addensati compresi nelle unità alluvionali “AES6” e fino alla base del sub Sistema SERS (AES). Secondo la nomenclatura scientifica in materia, si tratterebbe, peraltro, di un “pseudobedrock” sismico, in quanto depositi ancora caratterizzati da Vs inferiori a 800 m/s. Anche il settore di interconoide Reno–Savena è caratterizzato da registrazioni HVSR prive di contrasti di impedenza a frequenze medio-alte. Le indagini geognostiche hanno infatti confermato l'assenza di intervalli grossolani nei primi 30 metri.

Ai fini della quantificazione delle amplificazioni, nella pianura si sono dunque delimitati gli areali caratterizzati da depositi grossolani poco profondi (fino a -30 metri) in grado di espletare condizionamenti della risposta sismica locale e per le coperture “soffici” sovrastanti le indagini geofisiche disponibili hanno consentito di determinare le relative Vs equivalenti (Vs30 e VsH), come schematizzato nella figura 6.4.

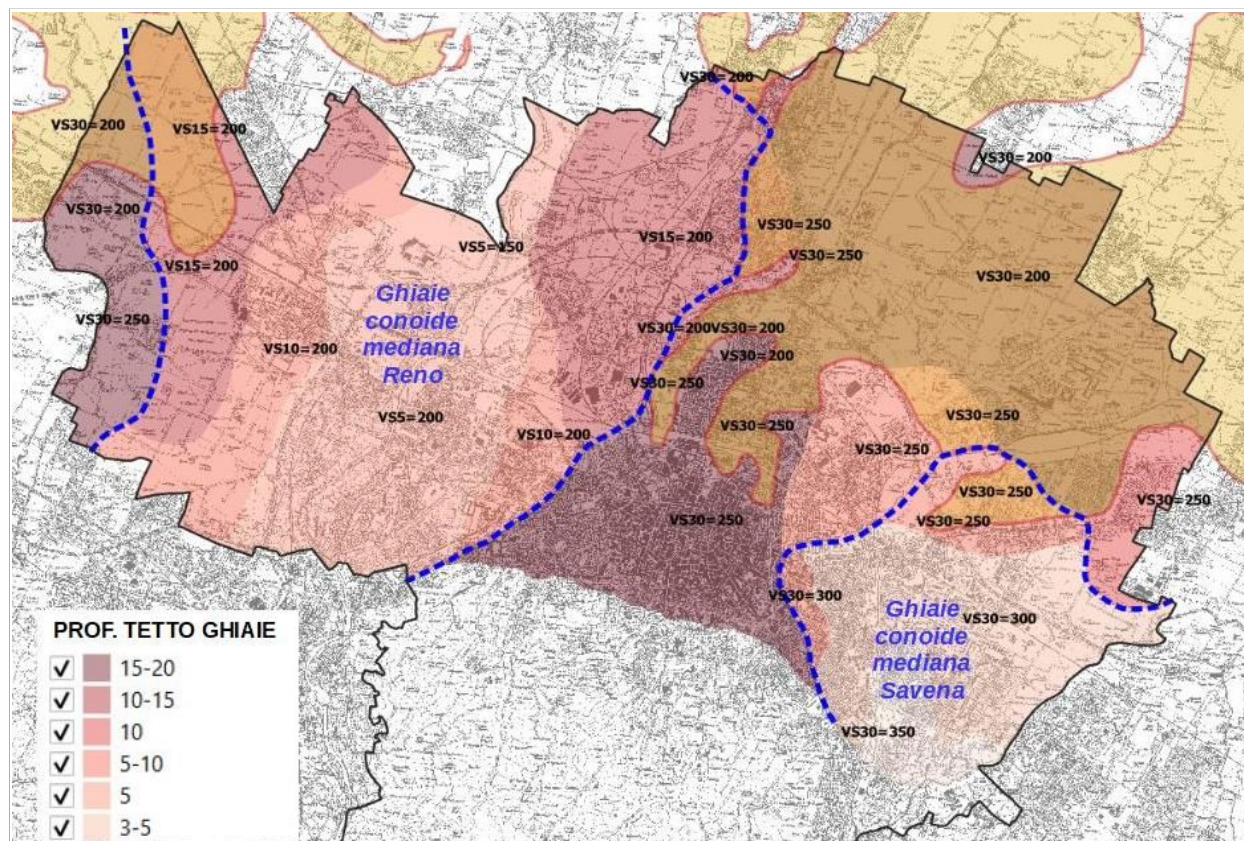


Figura 6.4 - La figura propone lo schema delle MOPS ottenute per il settore di pianura e basate sulla profondità del tetto delle ghiaie meno profonde e sulla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità (in giallo). Si riportano le velocità equivalenti considerate

Per quanto riguarda il settore collinare, nel paragrafo 5.2 vengono descritti i principali esiti desunti dalle indagini disponibili. Si rammenta che tali indagini hanno chiaramente evidenziato areali caratterizzati da coperture amplificabili (alluvionali e di versante) sovrastanti il substrato roccioso marino.

Le indagini disponibili nel settore collinare hanno riscontrato anche estesi areali caratterizzati da substrato roccioso affiorante/subaffiorante pelitico o arenitico poco cementato (CIG; TER; FAA; IMO) che risulta alterato per deformazioni di natura tettonica (vedi anche paragrafo 3.2), come confermano i modesti valori di V_s (V_{s30} comprese tra poco meno di 250 m/s e 350 m/s). Per estesi areali di collina non è stato pertanto possibile attribuirli a “bedrock sismico affiorante” ma cautelativamente si sono considerati spessori di copertura fino a circa 30 metri, estrapolando a tali profondità le V_s equiparabili a un bedrock tuttavia da considerarsi “non rigido”.

Si sono inoltre evidenziati areali caratterizzati da substrato roccioso più competente (PAT e GES), tuttavia da considerarsi bedrock sismico “non rigido” (V_{s30} fino a poco oltre 500 m/s). Per quanto riguarda i depositi evaporitici presenti nell'area di studio, occorre premettere che non si rilevano cavità sepolte particolarmente significative dal punto di vista della risposta sismica locale. Si sono tuttavia riscontrati spessori superficiali riconducibili a coperture alluvionali, detritiche e/o di disfacimento del substrato gessoso in grado di contribuire all'amplificazione del moto sismico al suolo.

La figura 6.5 rappresenta uno schena di sintesi della suddivisione del territorio di collina in base allo spessore delle coperture maggiormente amplificabili e in base al substrato roccioso affiorante (caratterizzato da V_{s30} approssimabili da 350 m/s a 500 m/s). La figura riporta anche le indagini geofisiche di riferimento per la modellazione sismostratigrafica.

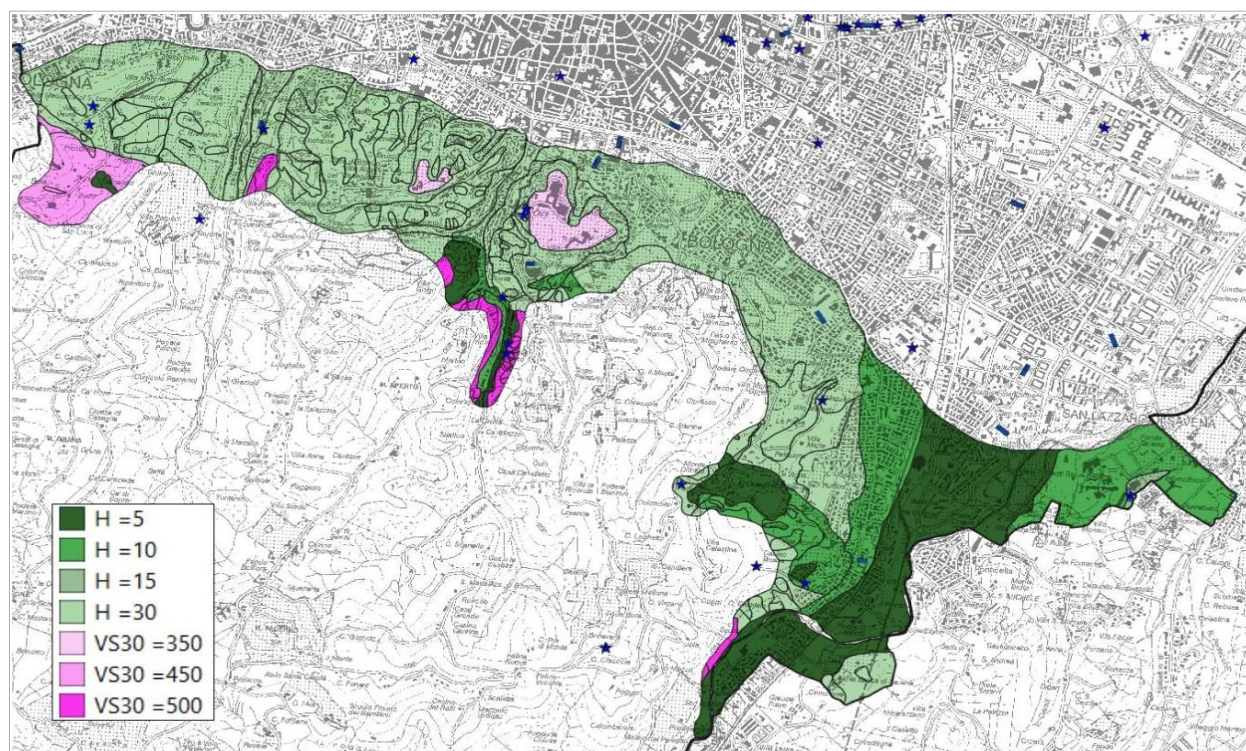


Figura 6.5 - Spessore delle coperture nel settore di collina ed ondovalle (in tonalità di verde) e in base al substrato roccioso affiorante (in tonalità rosa). La figura riporta e indagini geofisiche di riferimento per la modellazione sismostratigrafica

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS

7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 2” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi semplificate (abachi)
- zone “di attenzione” → a loro volta suddivise per tipologia di instabilità, con stima della pericolosità da ricavare in termini quantitativi (ulteriori analisi di livello 3)

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.1), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. La cartografia di MS può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”.

Per il Comune di Bologna, lo studio sismico di livello 2 ha permesso di valutare i fattori di amplificazione sismica semplificata delle MOPS individuate per gli areali di studio. La stima dell'amplificazione si è basata sul modello di sottosuolo locale valutato per le aree studiate (cfr capitolo 5) in particolare considerando gli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 630/2019 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Si rammenta che la DGR 630/2019 ha determinato l'aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007 e DGR2193/2015).

I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le zone di attenzione per instabilità.

7.2 Sintesi illustrativa delle MOPS

La raccolta ed elaborazione dei dati disponibili ha consentito la suddivisione del territorio studiato in aree qualitativamente omogenee in prospettiva sismica (MOPS). Per il settore di pianura, la delimitazione delle MOPS ha tuttavia considerato, in relazione alle caratteristiche sismostratigrafiche locali, anche il contesto deposizionale caratteristico, in quanto può risultare strettamente connesso alla variabilità della risposta sismica e alla possibilità di innesco di altri fenomeni cosismici (es. liquefazioni), come già descritto nei capitoli capitoli. Per il settore

collinare, la delimitazione delle MOPS ha tenuto in considerazione anche gli aspetti geomorfologici dell'areale stesso, anch'esse in grado di condizionare sia la risposta sismica, sia la complessiva stabilità di versante.

Nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si sono distinte 29 zone stabili suscettibili di amplificazioni, compreso la parte di territorio caratterizzato da substrato affiorante molto alterato. Nello schema seguente sono riportate le descrizioni sintetiche delle MOPS così classificate. Come si può notare, per ciascuna microzona è riportato lo spessore delle coperture che è stato considerato nel calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo di un'eventuale porzione di bedrock alterato (per il settore di collina).

2099	Zona 99 – Substrato affiorante molto alterato, fratturato o detensionato.
2001	Zona 1 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati (più frequenti a profondità >15/20 metri) e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Lavino (settore di “Margine di tipo B”).
2002	Zona 2 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati (più frequenti a profondità >10/15 metri) e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Reno (settore di “Margine di tipo B”).
2003	Zona 3 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati (più frequenti a profondità >15/20 metri) e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2004	Zona 4 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati (più frequenti a profondità >10 metri) e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2005	Zona 5 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con frequenti intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità >5/10 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2006	Zona 6 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con frequenti intervalli ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità >5/10 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente costituiti da alternanze di limi, sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2007	Zona 7 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con diffusi intervalli ghiaioso sabbiosi poco consolidati a profondità >3/5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente costituiti da alternanze di limi, sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2008	Zona 8 – Depositi alluvionali superficiali prevalentemente sabbioso ghiaiosi e sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente costituiti da alternanze di sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena.
2009	Zona 9 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli ghiaioso sabbiosi discontinui poco consolidati nei primi 10/15 metri e sovrastanti ghiaie più consolidate alternate ad altri depositi alluvionali limosi e sabbiosi a comportamento più rigido. Conoide mediana Reno (settore di “Margine di tipo A”).
2010	Zona 10 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli ghiaioso sabbiosi discontinui poco consolidati nei primi 5/10 metri e sovrastanti ghiaie più consolidate alternate ad altri depositi alluvionali limosi e sabbiosi a comportamento più rigido. Conoide mediana Reno (settore di “Margine di tipo A”).
2011	Zona 11 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con intervalli ghiaioso sabbiosi discontinui poco consolidati nei primi 5/7 metri e sovrastanti ghiaie più consolidate alternate ad altri depositi alluvionali prevalentemente costituiti da alternanze di sabbie e ghiaie a comportamento più rigido. Conoide mediana Reno (settore di “Margine di tipo A”).
2012	Zona 12 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >15/20 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Interconoide Reno-Savena (settore di “Margine di tipo B”).
2013	Zona 13 – Coperture prevalentemente alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose e bedrock alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (IMO1). Spessore medio delle coperture 15 metri.

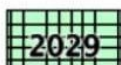
2014	Zona 14 – Coperture alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose e bedrock alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (IMO; TER; GES). Spessore medio coperture 10/12 metri. Piana di fondovalle terrazzata Savena.
2015	Zona 15 – Coperture alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose e bedrock alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (TER; GES; PAT). Spessore medio coperture 5/7 metri. Piana di fondovalle terrazzata Savena.
2016	Zona 16 – Coperture alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose con spessori di alterazione fino a 10 metri (suolo) e sovrastanti bedrock marino molto alterato <<800 m/s (IMO1).
2017	Zona 17 – Coperture alluvionali pedogenizzate (suolo) prevalentemente limoso sabbiose di limitato spessore e sovrastanti bedrock marino molto alterato <<800 m/s (IMO1).
2018	Zona 18 – Coperture alluvionali pedogenizzate (suolo) prevalentemente ghiaioso sabbiose, di limitato spessore e sovrastanti bedrock marino molto alterato <<800 m/s (IMO1). Organizzati in alcuni ordini di terrazzi.
2019	Zona 19 – Coperture alluvionali prevalentemente limoso sabbiose fino a 8/12 metri sovrastanti bedrock marino non rigido molto alterato <<800 m/s (IMO1; TER).
2020	Zona 20 – Coperture alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose e bedrock marino alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (PAT). Spessore medio coperture 8/12 metri.
2021	Zona 21 – Coperture alluvionali da limoso sabbiose a ghiaiose di limitato spessore e bedrock marino alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (PAT). Spessore medio coperture 5/7 metri.
2022	Zona 22 – Coperture eluvio-colluviali prevalentemente fini (clasti di roccia, sabbie, peliti) e bedrock alterato sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (PAT). Spessore medio coperture 8/12 metri.
2023	Zona 23 – Coperture eluvio-colluviali prevalentemente fini (clasti di roccia, sabbie, peliti) e bedrock alterato sovrastanti bedrock marino non rigido (GES). Spessore medio coperture 8/12 metri (eluvium-colluvium+bedrock molto alterato). Settore di "APPENNINO con bedrock non rigido" <<800 m/s).
2024	Zona 24 – Coperture eluvio-colluviali prevalentemente fini (clasti di roccia, sabbie, peliti) e bedrock alterato di limitato spessore sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (PAT). Spessore medio coperture 5/7 metri.
2025	Zona 25 – Coperture eluvio-colluviali prevalentemente fini (clasti di roccia, sabbie, peliti) e bedrock alterato di limitato spessore sovrastanti bedrock marino non rigido <<800 m/s (GES). Spessore medio coperture 5/7 metri.
2026	Zona 26 – Coperture eluvio-colluviali prevalentemente fini (clasti di roccia, sabbie, peliti) di limitato spessore sovrastanti bedrock marino molto alterato e/o detensionato <<800 m/s (TER, FAA, IMO).
2027	Zona 27 – Bedrock marino subaffiorante costituito prevalentemente da sabbie e areniti stratificate e poco cementate (IMO1).
2028	Zona 28 – Bedrock marino subaffiorante costituito prevalentemente da rocce lapidee stratificate (PAT).

Nei seguenti schemi sono invece riportate le descrizioni relative alle zone di attenzione per instabilità. Queste ulteriori zone individuano le seguenti principali criticità correlabili ad eventi sismici:

- possibilità di liquefazioni in caso di sisma, per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri (zone differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici);
- possibilità di instabilità di versante. I movimenti franosi perimetrati sono classificati per

meccanismi di movimento, indicando anche la presenza di accumulo o distacco e i principali depositi (coperture o substrato roccioso) coinvolti nel dissesto;

- possibilità di cedimenti differenziali/crollo/cavità/ sinkhole. In questa tipologia di instabilità vengono comprese anche le aree di cava e i tombamenti antropici.



2029

ZA_LQ 29 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi nei primi 5/15 metri (paleoalvei e tracimazioni Lavino). Intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >15/20 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Lavino.



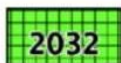
2030

ZA_LQ 30 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi nei primi 5/15 metri (paleoalvei e tracimazioni Reno). Intervalli ghiaioso sabbiosi discontinui poco consolidati nei primi 10/15 metri e sovrastanti ghiaie più consolidate alternate ad altri depositi alluvionali a comportamento più rigido. Conoide mediana Reno.



2031

ZA_LQ 31 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi nei primi 5/15 metri (paleoalvei Aposa e/o Ravone?). Intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >15/20 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Interconoide Reno-Savena.



2032

ZA_LQ 32 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>>1 metro) nei primi 5/15 metri (paleoalvei e tracimazioni Reno). Intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >10/15 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Reno.



2033

ZA_LQ 33 – Depositi alluvionali da limoso argillosi a limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi nei primi 5/15 metri (paleoalvei e tracimazioni Savena). Intervalli ghiaioso sabbiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >15/20 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide distale Savena.



2034

ZA_LQ 34 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi nei primi 5/15 metri (paleoalvei e tracimazioni Savena). Intervalli sabbioso ghiaiosi poco consolidati più frequenti a profondità >10 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali costituiti da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena.



2035

ZA_LQ 35 – Depositi alluvionali limoso sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi a profondità >5 metri (paleoalvei e tracimazioni Savena). Intervalli ghiaiosi discontinui poco consolidati più frequenti a profondità >10 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente costituiti da alternanze di limi, sabbie e ghiaie. Conoide mediana Savena.



2036

ZA_FR 36 (3011) – Zona di prevalente distacco per crollo nel bedrock lapideo.



2037

ZA_FR 37 (3011) – Zona di prevalente accumulo per crollo derivato da bedrock lapideo.



2038

ZA_FR 38 (3012/3022) – Zona di prevalente distacco per frana di scorrimento nel bedrock pelitico.



2039

ZA_FR 39 (3012/3022) – Zona di prevalente distacco per frana di scorrimento nel bedrock lapideo.



2040

ZA_FR 40 (3012/3022) – Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento derivato da bedrock pelitico.



2041

ZA_FR 41 (3012/3022) – Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento derivato da bedrock lapideo.



2042

ZA_FR 42 (3013/3023) – Zona di prevalente distacco per colata nel bedrock pelitico.

2043	ZA_FR 43 (3023) – Zona di prevalente distacco per colata nel bedrock lapideo.
2044	ZA_FR 44 (3013/3023) – Zona di prevalente accumulo per colata derivato da bedrock pelitico.
2045	ZA_FR 45 (3023) – Zona di prevalente accumulo per colata derivato da bedrock lapideo.
2046	ZA_FR 46 (3014/3024) – Zona di prevalente accumulo per frana complessa derivato da bedrock pelitico.
2047	ZA_FR 47 (3045) – Zona di potenziale evoluzione di frana.
3080	ZA_CD – Zona di attenzione per cedimenti differenziali/crollo di cavità/sinkhole.

7.3 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 630/2019 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a $T_r = 475$ (con smorzamento $\zeta = 5\%$) e si riferiscono a:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido" (PGA/PGA_0). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido". I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:
 - SA1 → 0,1s–0,5s [FA0105]
 - SA2 → 0,4s–0,8s [FA0408]
 - SA3 → 0,7s–1,1s [FA0411]
 - SA4 → 0,5s–1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa
- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:
 - SI1 → 0,1s–0,5s [FH0105]
 - SI2 → 0,5s–1,0s [FH0510]

SI3 → 0,5s-1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

7.3.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali: calcolo dei fattori di amplificazione

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato tutto il territorio comunale di pianura, mentre per il settore collinare ha interessato tutte le aree urbanizzate/urbanizzabili e un'ulteriore e opportuna fascia di territorio adiacente.

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, nello studio di microzonazione sismica di livello 2, i fattori di amplificazione vengono calcolati con approccio semplificati mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 630/2019), sulla base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della riposta sismica locale (cfr. capitolo 5).

La seguente tabella 7.1 riporta la sintesi riepilogativa dei fattori di amplificazione (FA) riferibili alle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS). Si riportano il macrocontesto attribuibile a tale zona e i parametri (spessori; VsH; VS30) necessari per il calcolo dei FA. Per ulteriori dettagli sulle caratteristiche litostratigrafiche delle aree MOPS si rimanda a quanto indicato nella descrizione cartografica (paragrafo 8.4). Si precisa che per tutte le MOPS attribuite al macrocontesto "Appennino*" ((Allegato A2 DGR 630/2019) si è considerato un substrato sismico "non rigido", come spiegato nei precedenti capitoli.

Tabella 7.1 – Calcolo dei fattori di amplificazione per le zone "stabili suscettibili di amplificazioni"

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30 VSH	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2001	MARGINE B	VS30 =250 VS30 =200	1,6 1,6	1,8 1,8	2,3 2,6	2,7 2,9	2,6 2,9	1,9 1,9	2,5 2,8	2,7 3,1	
2002	MARGINE B	VS30 =250 VS30 =200	1,6 1,6	1,8 1,8	2,3 2,6	2,7 2,9	2,6 2,9	1,9 1,9	2,5 2,8	2,7 3,1	
2003	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	
2004	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
2005	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
2006	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
2007	MARGINE B	VS30 =300	1,6	1,7	2,1	2,4	2,3	1,8	2,3	2,4	
2008	MARGINE B	VS30 =350	1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2	
2009	MARGINE A	VS15 =200	2,1	2,4	2,9	2,3	-	2,5	2,1	-	
2010	MARGINE A	VS10 =200	2,2	2,3	2,2	1,8	-	2,4	2	-	
2011	MARGINE A	VS5 =200 VS5 =150	2,1 2,3	2,0 2,3	1,7 1,9	1,6 1,6	- -	1,9 2,2	1,7 1,8	- -	
2012	MARGINE B	VS30 =250 VS30 =200	1,6 1,6	1,8 1,8	2,3 2,6	2,7 2,9	2,6 2,9	1,9 1,9	2,5 2,8	2,7 3,1	
2013	APPENNINO*	VS15 =200	2,2	2,5	2,3	1,7	-	2,6	1,9	-	
2014	APPENNINO*	VS10 =250	2,0	1,9	1,5	1,4	-	1,9	1,4	-	

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30 VSH	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2015	APPENNINO*	VS5 =200	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	
2016	APPENNINO*	VS30 =300	2,0	2,2	2,3	1,7	-	2,3	1,9	-	In limitate zone di scarpata sono stati calcolati ulteriori FA topografici (da 1,1 a 1,4)
2017	APPENNINO*	VS30 =300	2,0	2,2	2,3	1,7	-	2,3	1,9	-	
2018	APPENNINO*	VS30 =300	2,0	2,2	2,3	1,7	-	2,3	1,9	-	In limitate zone di scarpata sono stati calcolati ulteriori FA topografici (da 1,1 a 1,2)
2019	APPENNINO*	VS30 =300 VS30 =250	2,0 2,1	2,2 2,3	2,3 2,9	1,7 2,3	-	2,3 2,4	1,9 2,7	-	
2020	APPENNINO*	VS10 =200	2,2	2,3	1,8	1,5	-	2,3	1,6	-	
2021	APPENNINO*	VS5 =200	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	
2022	APPENNINO*	VS10 =200	2,2	2,3	1,8	1,5	-	2,3	1,6	-	
2023	APPENNINO*	VS10 =200	2,2	2,3	1,8	1,5	-	2,3	1,6	-	
2024	APPENNINO*	VS5 =200	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	
2025	APPENNINO*	VS5 =200	2,0	1,8	1,4	1,3	-	1,7	1,4	-	
2026	APPENNINO*	VS30 =300 VS30 =250	2,0 2,1	2,2 2,3	2,3 2,9	1,7 2,3	-	2,3 2,4	1,9 2,7	-	
2027	APPENNINO*	VS30 =350	1,9	1,9	1,7	1,4	-	1,9	1,5	-	In limitate zone di scarpata sono stati calcolati ulteriori FA topografici (da 1,1 a 1,2)
2028	APPENNINO*	VS30 =500 vs30 =450	1,4 1,6	1,4 1,6	1,4 1,5	1,3 1,3	-	1,4 1,6	1,4 1,4	-	In limitate zone di scarpata e crinale sono stati calcolati ulteriori FA topografici (da 1,1 a 1,2)
2099	APPENNINO*	VS30 =300 VS30 =250	2,0 2,1	2,2 2,3	2,3 2,9	1,7 2,3	-	2,3 2,4	1,9 2,7	-	In limitate zone di scarpata e crinale sono stati calcolati ulteriori FA topografici (da 1,1 a 1,2)

7.3.2 Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrate come “zone di attenzione per instabilità” per liquefazioni e per instabilità di versante, come indicato negli Standard di MS v. 4.1 (CTMS, 2018). Tuttavia, sono aree ove vengono richiesti ulteriori approfondimenti (livello 3).

La seguente tabella 7.2 riporta il calcolo dei fattori di amplificazione attribuiti alle zone di attenzione per liquefazioni.

Tabella 7.2 – Calcolo dei fattori di amplificazione per le zone “di attenzione per instabilità (liquefazioni)”

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30 VSH	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2029	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	
2030	MARGINE A	VS15 =200	2,1	2,4	2,9	2,3	-	2,5	2,1	-	
2031	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
		VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	
2032	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
		VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	
2033	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	
2034	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	
2035	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	

Le aree di attenzione per instabilità di versante sono desunte dalla cartografia geologica RER (superfici di frana già classificate), dall'Inventario del dissesto RER, dall'archivio del dissesto del Comune di Bologna (con zone di frana e zone potenzialmente instabili già soggette a norme e limitazioni d'uso come specificato nel regolamento edilizio comunale. Lo studio di MS ha dunque considerato sia le aree di dissesto (in gran parte coincidenti con l'inventario del dissesto del SGSS regionale), sia le zone di possibile evoluzione già perimetrate e oggetto di specifica normativa urbanistica comunale.

Sono state considerate come zone di attenzione per instabilità di versante tutte le coperture continentali, caratterizzate da acclività superiore a 15°.

Gli spessori delle coperture potenzialmente instabili sono desunti da indagini geognostiche disponibili in sito. Per il calcolo dei fattori di amplificazione relativi ai corpi di frana (che andranno tuttavia confermati con studi di approfondimento di livello 3), si è inoltre considerato il contesto litostratigrafico e sismico locale e stimata la profondità del piano di taglio/scivolamento della frana compatibilmente con lo spessore delle coperture e/o bedrock alterato. Più in generale, ma soprattutto nel caso di frane di modesta estensione oppure nelle zone di possibile evoluzione del dissesto, si è spesso considerato come intervallo maggiormente amplificabile la profondità delle eventuali coperture e/o il bedrock alterato del circostante versante stabile, visto che il piano di taglio dovrebbe verosimilmente interessare solamente tale spessore.

7.3.3 Effetti della topografia: calcolo dei fattori di amplificazione

Negli areali di collina, lo studio ha consentito il controllo degli effetti morfologici sulla stima della risposta sismica locale. Nei pendii con inclinazione media inferiore a 15° tale controllo è stato trascurato, mentre nei pendii più acclivi (<15°) e nelle particolari configurazioni geometriche bidimensionali e tridimensionali (es. cucuzzoli, creste, dorsali allungate) di altezza superiore a 30 metri il calcolo dei fattori di amplificazione topografica è stato eseguito secondo quanto indicato nelle DGR n. n. 2047/2018 e DGR n. 630/2019 (figura 7.1).

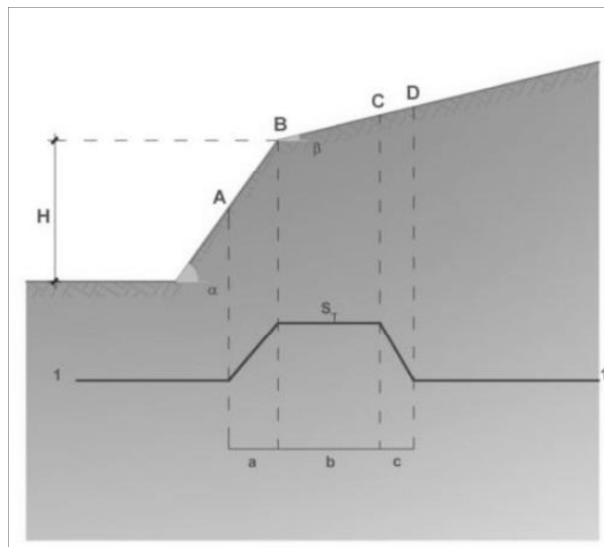


Figura 7.1 - Schema geometrico per il calcolo degli effetti della topografia (cfr. DGR 630/2019)

In base alla geometria descritta in figura 7.1, il valore del fattore di amplificazione topografica ST è dato dalla seguente relazione:

$$ST = 1 + 0,8 \cdot (\alpha - \beta - 0,4) \text{ sul segmento BC}$$

dove:

b = valore minimo tra 20α e $(H+10)/4$

α è il gradiente del fronte più ripido e β del fronte meno ripido.

$$ST = 1 \text{ in A (a = H/3)}$$

$$St = 1 \text{ in D (c = H/4)}$$

I rilievi che caratterizzano il territorio collinare Bolognese negli areali studiati, non presentano particolari elevazioni e scarpate ripide, per la prevalente presenza di substrato roccioso pelitico (CIG; TER; FAA) oppure arenaceo poco cementato (IMO), facilmente erodibile e modellabile. Sono tuttavia riscontrabili, alcuni limitati settori morfologicamente più elevati, con bedrock marino lapideo e più competente, attribuito alla Formazione di Pantano (affiorante, ad esempio, nei rilievi circostanti il Santuario di San Luca). Sono anche individuabili alcuni pianalti con scarpate di limitata estensione ma con acclività e dislivelli anche superiori a 30÷40 metri fino quasi a ridosso della pianura e sulle formazioni FAA e IMO (scarpate morfologiche di origine tettonica).

L'analisi delle possibili amplificazioni topografiche si è dunque basata sull'elaborazione di 21 sezioni topografiche, rappresentate nella figura 7.2, costruite in presenza di condizioni morfologiche da verificare. Le tracce sono state elaborate mediante software GIS e base topografica CTR regionale (scala 1:5.000).

Le verifiche hanno escluso amplificazioni soltanto nella sezione n.20 (comunque rappresentata nella figura 7.2 e riportata nell'allegato) mentre gli esiti ricavati sugli altri modelli morfologici hanno permesso di stimare amplificazioni topografiche comprese da 1,1 e 1,4. Gli esiti di amplificazione topografica maggiore sono prevalentemente riconducibili a situazioni morfologiche di crinale e cucuzzoli. Le figure 7.3-7.4-7.5 sintetizzano gli esiti di calcolo di ST e delle relative aree di influenza.

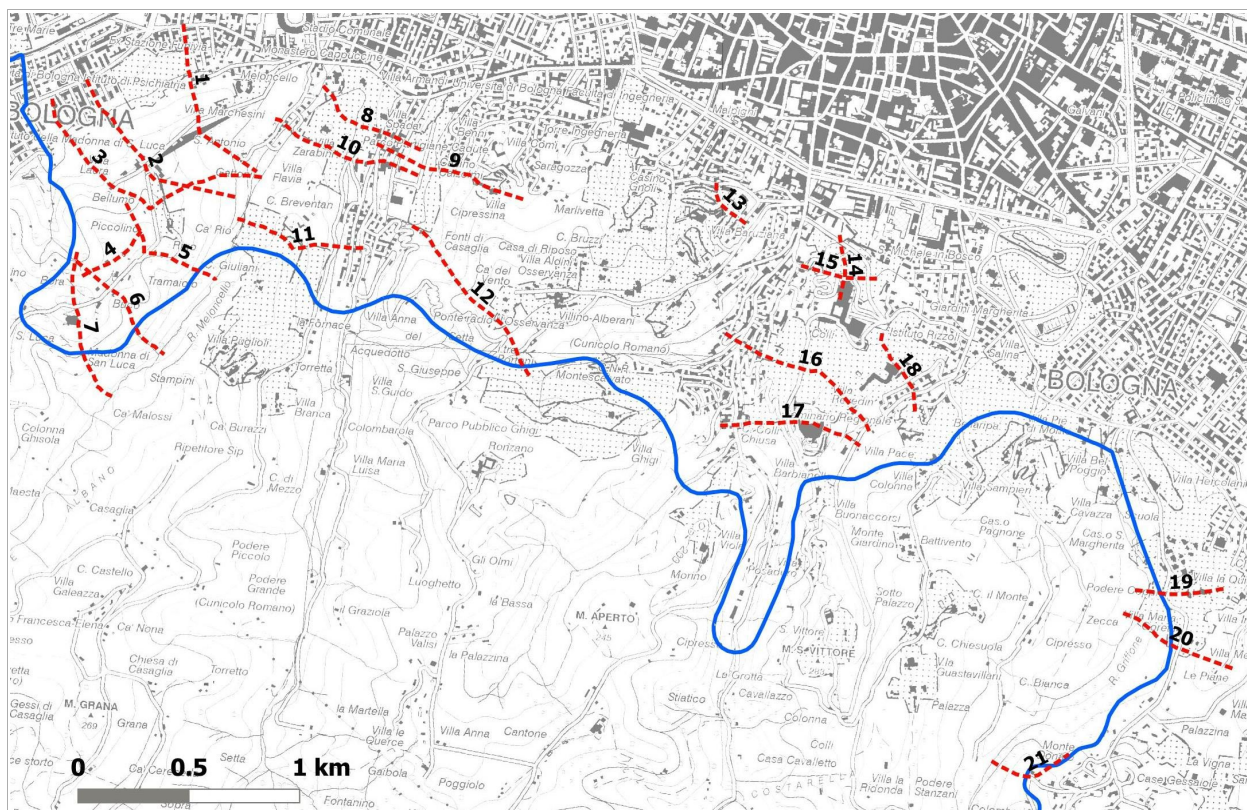


Figura 7.2 - Localizzazione delle sezioni topografiche elaborate per il controllo e calcolo dei fattori di amplificazione topografica ST

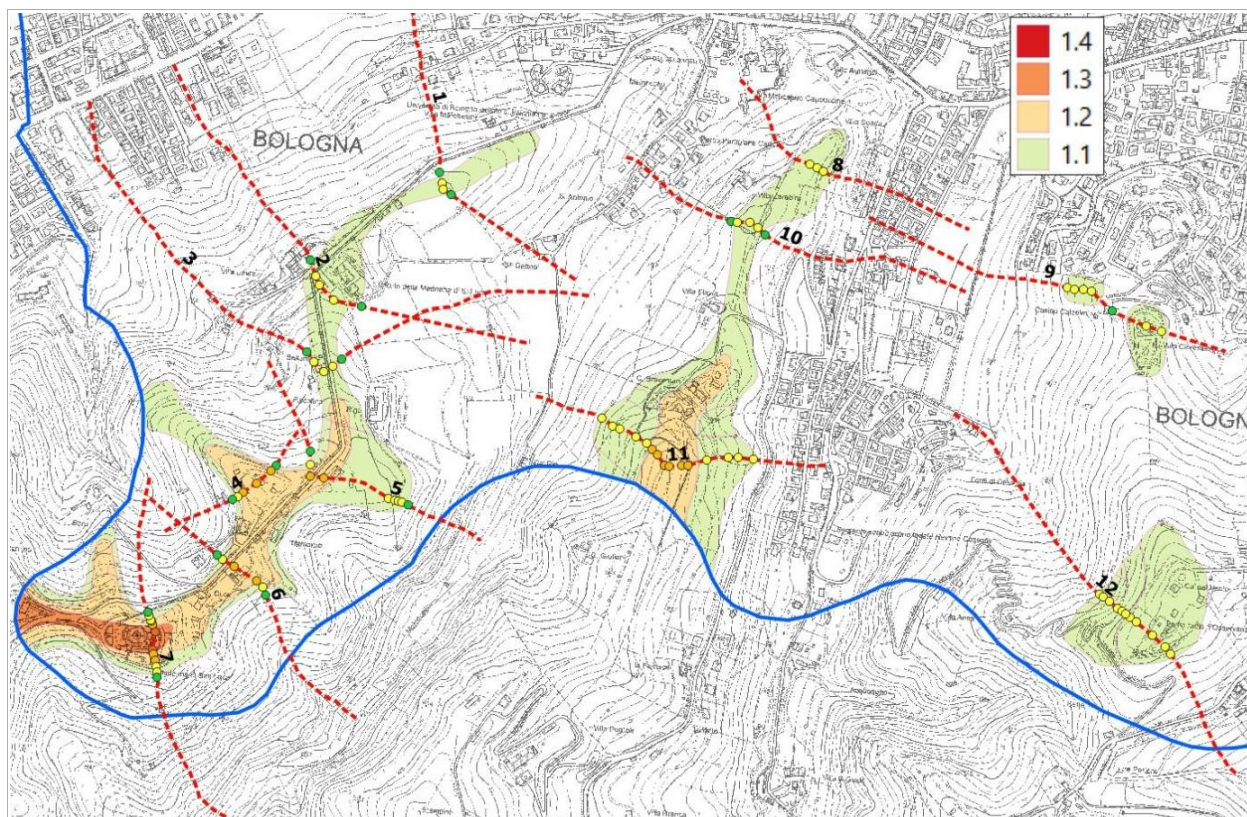


Figura 7.3 - Fattori di amplificazione ST e relative aree di influenza calcolate (punto) ed estrapolate (area). Settore collinare occidentale (Madonna di San Luca)

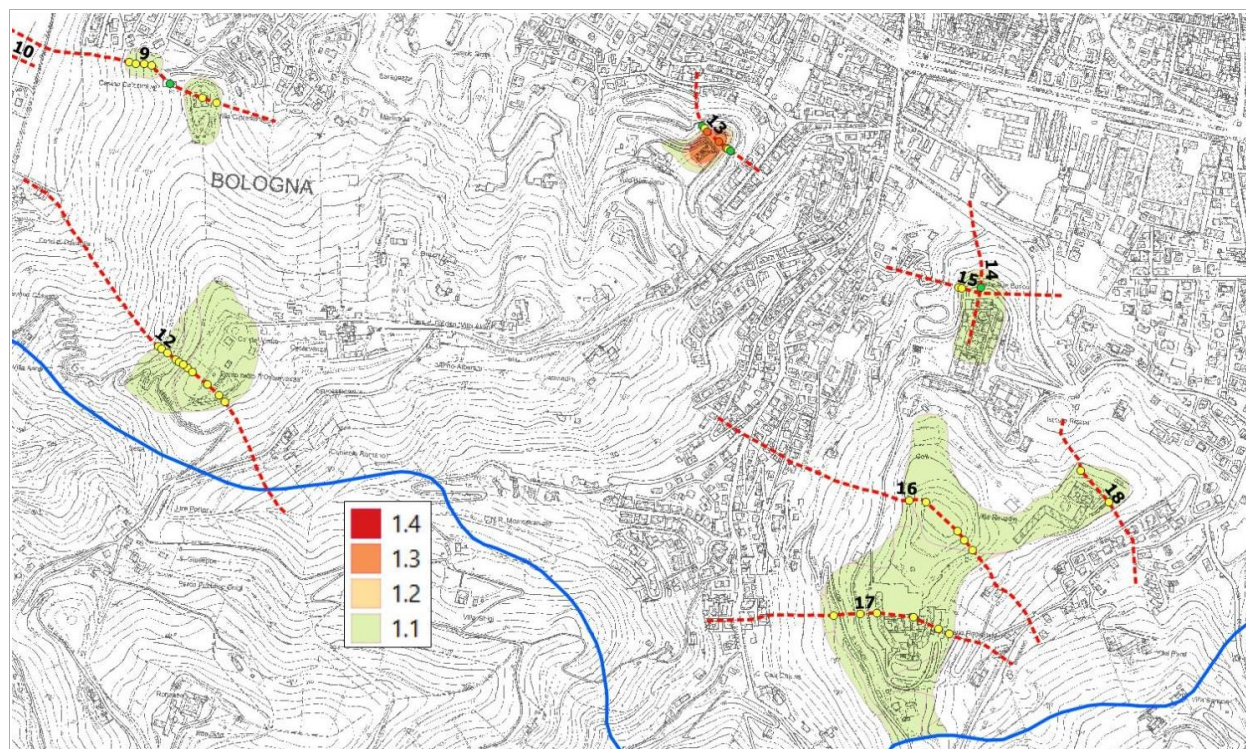


Figura 7.4 - Fattori di amplificazione ST e relative aree di influenza calcolate (punto) ed estrapolate (area). Settore collinare centrale (Seminario Regionale; San Michele in Bosco)

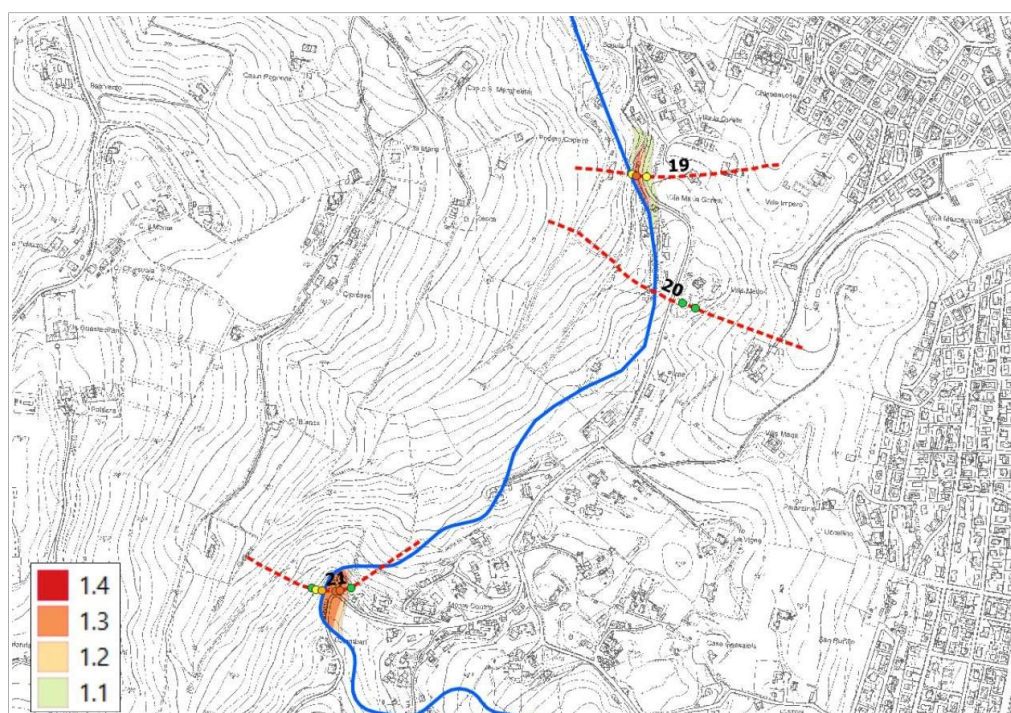


Figura 7.5 - Fattori di amplificazione ST e relative aree di influenza calcolate (punto) ed estrapolate (area). Settore collinare orientale (Monte Donato; via Siepelunga)

Nell'Allegato 2 si riportano le sezioni topografiche elaborate, con indicati gli esiti del calcolo del fattore di amplificazione ST più gravoso. Si precisa che le schede riferite ad ogni sezione riportano tra i parametri di calcolo l'inclinazione media dei versanti in gradi (sui quali vengono poi calcolati i rispettivi gradienti α e β). Occorre rammentare che, nei casi di crinale/cucuzzoli, l'angolo del fronte secondario e il relativo gradiente β risulta negativo.

7.4 Elaborazione dei valori di H_{SM}

Lo studio ha consentito di calcolare i valori di H_{SM} (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = (ASI_{UHS} / \Delta T) * FA$$

I valori di $ASI_{UHS} / \Delta T$ sono stati calcolati per ogni punto della griglia INGV (già disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del SGSS).

Le elaborazioni evidenziano valori tendenzialmente più alti nel settore collinare caratterizzato da coperture sovrastanti il substrato roccioso oppure in areali con bedrock "non rigido" molto alterato (risultati equiparabili a coperture profonde fino a 30 metri), cioè con un contributo importante all'esito di HSM indotto da fattori di amplificazione più elevati.

Un'ampia porzione della pianura occidentale, corrispondente al contesto deposizionale di conoide del Reno, è tuttavia caratterizzato da valori di H_{SM} ancora alti, anche in questo caso imputabili alle maggiori amplificazioni stratigrafiche stimate in questo settore di territorio.

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle Indagini

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative. Si tratta, complessivamente, di oltre 4.000 prove archiviate.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Bologna, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.1), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:10.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (analisi tessiturali; classificazione dei campioni prelevati) e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.1). La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri). Nel settore collinate con substrato affiorante, la classificazione geotecnica ha invece considerato le principali caratteristiche del bedrock già riportate nel data base della cartografia geologica regionale.

Il territorio di studio è stato suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 8.1.

In sintesi, si può evidenziare come nel settore di pianura i terreni più superficiali siano attribuibili a classi tessiturali da ghiaioso sabbiose a prevalentemente fini (limi e argille) in relazione al contesto deposizionale più recente (da depositi di conoide attribuibili al Reno e al Savena a depositi di piana e/o di interbacino). Nel settore pedecollinare, la cartografia riporta ampie aree con substrato affiorante/subaffiorante da pelitico ad arenaceo poco cementato (formazioni CIG, TER, FAA, IMO) che risulta detensionato e/o fratturato per deformazioni legate ad attività tettoniche relativamente recenti (si rimanda ai capitoli 3 e 5 per i dettagli).

La cartografia geologico-tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (creste; orli di terrazzo e scarpate; conoidi alluvionali; aree con cavità sepolte/doline/sinkhole; cavità sepolte puntuali; assi di paleoalvei)
- ✓ aree di instabilità di versante
- ✓ elementi tettonico strutturali (faglie certe e incerte)
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (giaciture strati; sondaggi/pozzi; punti controllo falda in aree con sabbie)
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro.
















Terreni di copertura e substrato geologico			
	Terreni contenenti resti di attività antropica		Sabbie limose, miscela di sabbia e limo – terrazzo fluviale (tf) e piana inondabile (pi)
	Ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbia – argine/barre/canali (es)		Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – piana inondabile (pi)
	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo – argine/barre/canali (es) e terrazzo fluviale (tf)		Argille e argille limose più o meno consistenti – eluvi/colluvi (ec)
	Ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla – argine/barre/canali (es), conoide alluvionale (ca)		
	Lapideo		Alternanza di litotipi stratificato
	Lapideo stratificato		Coesivo sovraconsolidato fratturato o detensionato
	Granulare cementato stratificato		Granulare cementato stratificato fratturato o detensionato
	Coesivo sovraconsolidato stratificato		Coesivo sovraconsolidato stratificato fratturato o detensionato

Figura 8.1 – Stralcio della legenda della Tavola 2a – Carta geologico-tecnica: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo meno profondo del territorio studiato di Bologna

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n. 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna e nella DGR 630/2019: 0,6 hz $f_0 \leq 1 \text{ hz}$; 1 hz $f_0 \leq 2$; 2 hz $f_0 \leq 8 \text{ hz}$; $f_0 > 8 \text{ hz}$.

Lo studio di microzonazione ha dunque permesso di proporre una classificazione delle frequenze di possibile amplificazione/risonanza distinguendo le classi sopra indicate con colori differenti.

La tavola permette di discriminare, con specifica simbologia, le misure anche in base all'entità del rapporto spettrale H/V riferito a contrasti di impedenza alla base delle coperture, in particolare discriminando le prove che hanno ricavato rapporti: $H/V < 2$ (ampiezze basse); $2 \leq H/V < 3$ (ampiezze moderate); $H/V \leq 3$ (ampiezze elevate).

I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno permesso di individuare zone in cui gli spessori delle coperture continentali e/o del substrato roccioso marino alterato sono significativi per la risposta sismica locale, di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito in alcuni casi il substrato rigido e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione.

Si rimanda al capitolo 5 per un'illustrazione più dettagliata dei risultati ottenuti dalle registrazioni sismiche HVSR. Tuttavia si segnala nuovamente come in alcuni settori di pianura (es. conoide Reno con ghiaie più consolidate) e collinari (es. aree con coperture quaternarie sovrastanti bedrock marino più rigido - PAT; GES), le registrazioni disponibili abbiano evidenziato amplificazioni spettrali più marcate a frequenze medio-alte ($f_0 > 2$ Hz).

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS

La cartografia MOPS, elaborata a diversa scala di dettaglio (1:10.000 per la pianura e 1:5.000 per la collina), rappresenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone stabili", "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e "Zone di attenzione per instabilità". Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

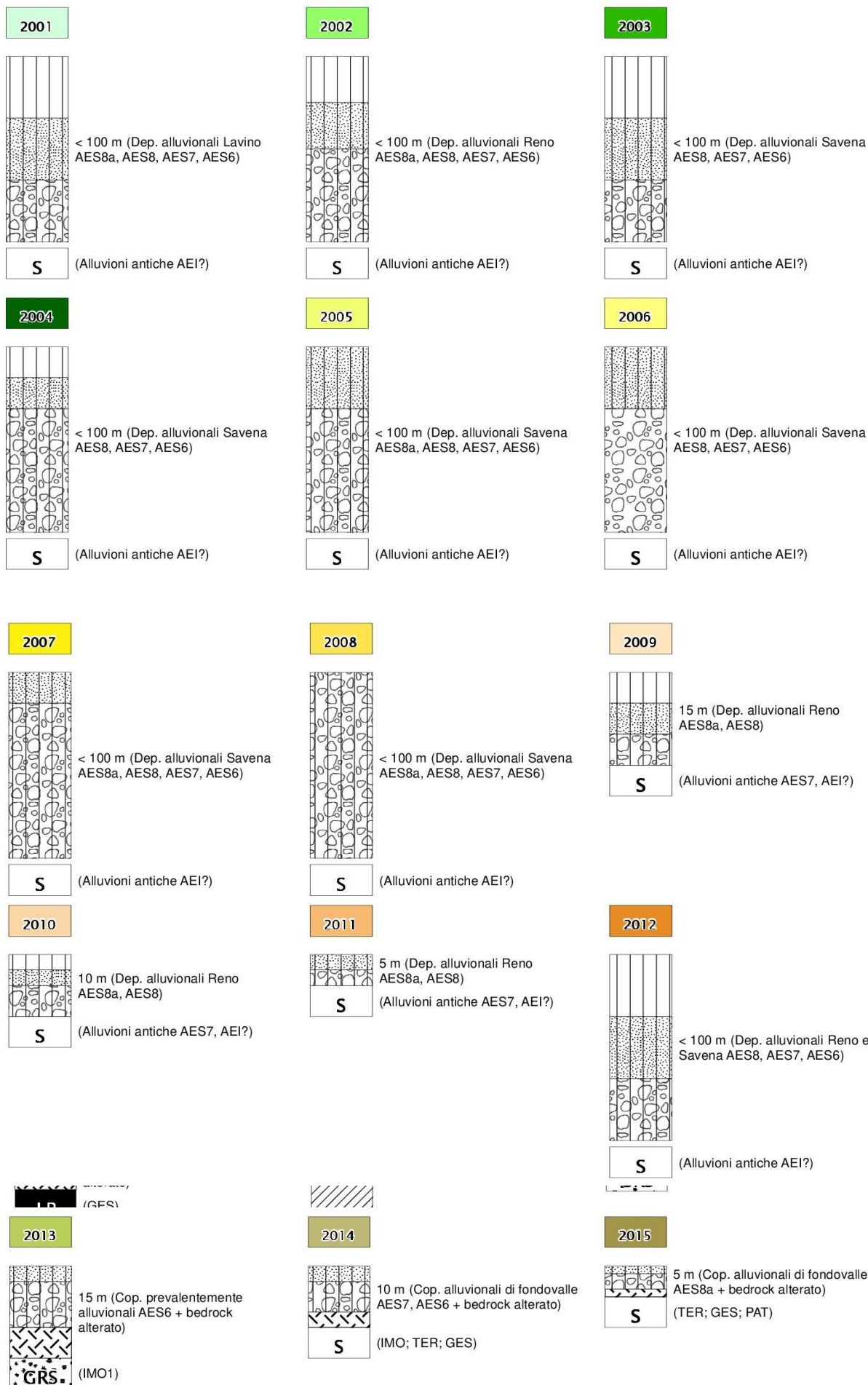
La carta riporta, inoltre, le "forme di superficie e sepolte" (già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della frequenza fondamentale) e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione "ft".

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle criticità locali.

Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, nel territorio studiato non si riscontrano "zone stabili", tuttavia sono distinte 29 zone stabili suscettibili di amplificazioni (compreso anche il substrato affiorante molto alterato).

Per ciascuna classe, in legenda viene indicato lo spessore delle coperture che è stato considerato nel calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo di un'eventuale porzione di bedrock alterato (per il settore di collina).

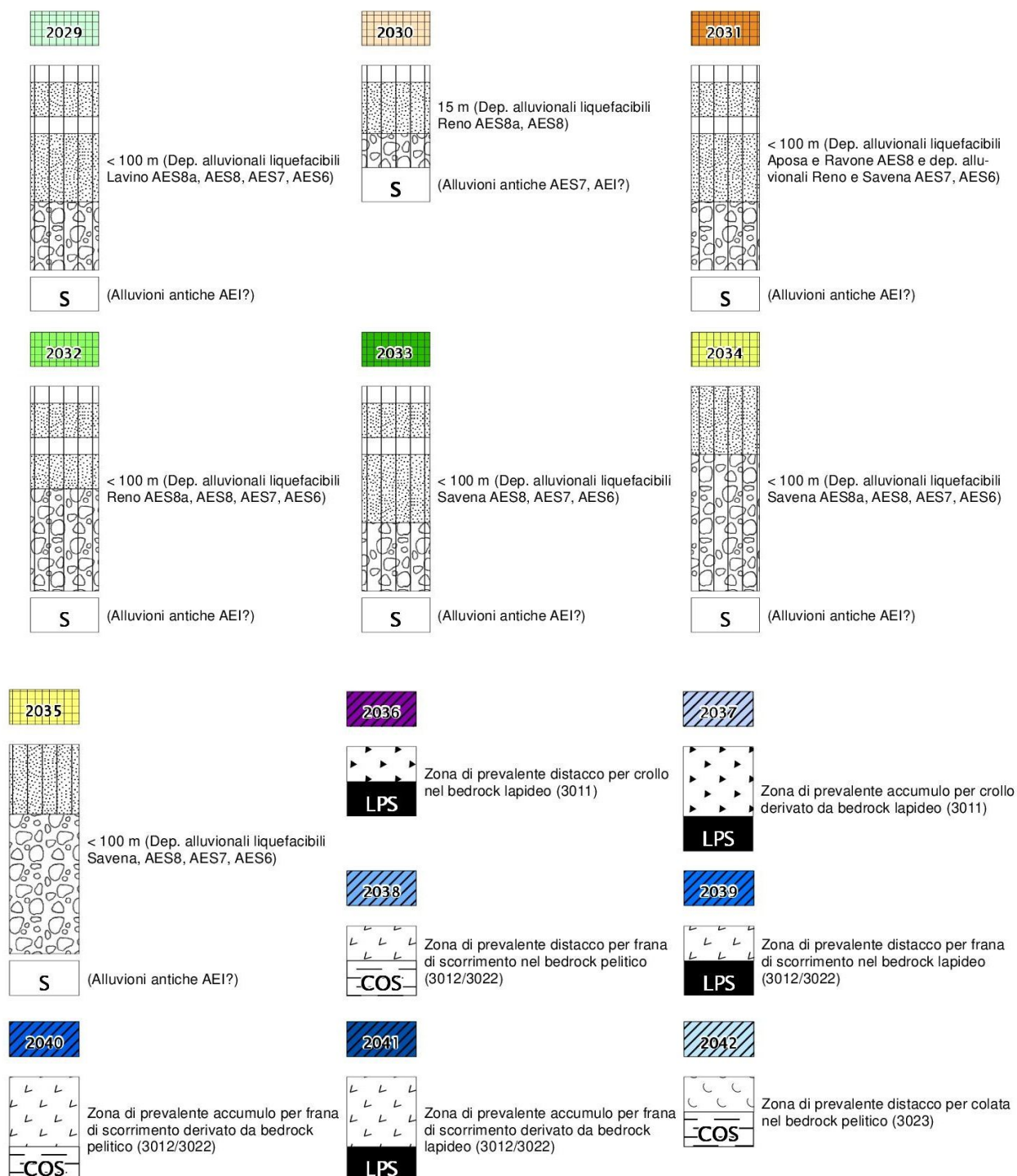
Il seguente schema riporta per le medesime zone i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi.

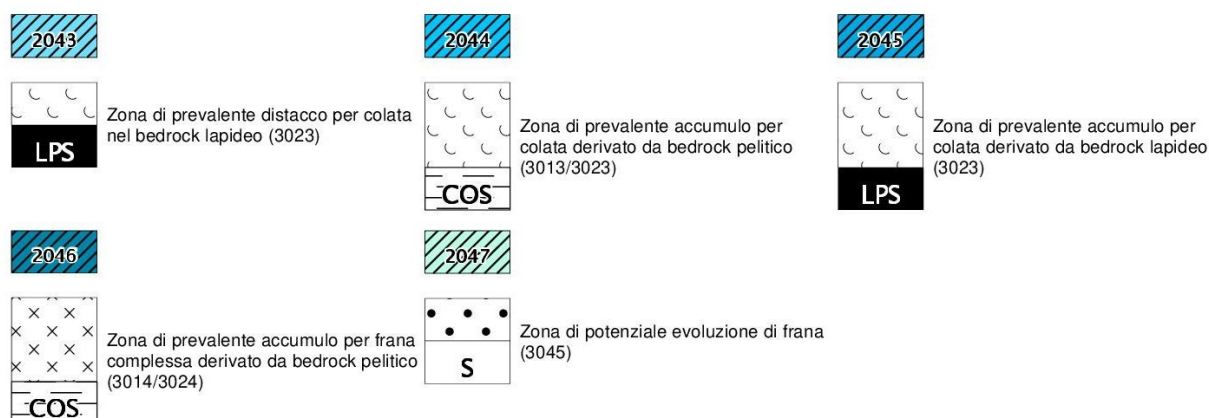


Le zone di attenzione per instabilità individuano le principali criticità correlabili ad eventi sismici (possibilità di liquefazioni; possibilità di instabilità di versante; possibilità di cedimenti differenziali/crollo/cavità/ sinkhole). In questa tipologia di instabilità vengono comprese anche le aree di cava e i tombamenti antropici.

Il seguente schema riporta per le zone di attenzione individuate i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi.

Per una descrizione sintetica di tutte le singole zone di rimanda al precedente paragrafo 7.2.





8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di V_s , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ($V_{s_{30}}$). Nelle situazioni di sottosuolo caratterizzate da coperture di minore spessore e in grado di condizionare il campo di moto verso la superficie, si sono riportati anche i valori di V_sH . Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia valutata con approccio semplificato (DGR 2047/2018; DGR 630/2019; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

Si segnala che il calcolo della V_sH ha interessato ampi settori del territorio collinare, per la presenza di coperture quaternarie sovrastanti il substrato marino più rigido oppure per la presenza di substrato roccioso molto alterato e/o detensionato e con V_s tali da non considerarsi bedrock sismico fino a 30 metri di profondità. Anche in alcuni settori di pianura (conoide Reno) gli esiti sismostratigrafici hanno condotto al calcolo di valori di V_sH (vedi capitoli 5 e 6).

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle V_s misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 2>> sono anch'esse elaborate a diversa scala di dettaglio (1:10.000 per la pianura e 1:5.000 per la collina) e riportano le "zone stabili suscettibili di amplificazioni" e le "zone di attenzione" riscontrate nel territorio studiato di Bologna che derivano dalla cartografia MOPS (Tavola 4).

Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica in quanto riportano per ogni zona i fattori di amplificazione calcolati. In questo senso è necessario specificare che:

- alle “zone stabili suscettibili di amplificazioni” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SA; FA SI) attraverso le suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.1). Si rammenta che agli areali studiati i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 630/2019, allegato A2).
- Per le “zone di attenzione” per instabilità” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SA; FA SI) sono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. capitolo 7) e considerando il contesto litostratigrafico e sismico locale. La stima dello spessore di sedimento rimaneggiato e maggiormente amplificabile è compatibile con la presunta profondità del piano di taglio/scivolamento della frana.

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone di attenzione i rispettivi parametri di amplificazione.

In sintesi, sono state elaborate le seguenti quattro cartografie di microzonazione sismica:

- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 – FA_{PGA} → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0));
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SA1} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SA2} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SA3} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,7 e 1,1 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SA4} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi) solo per il contesto di pianura.
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SI1} → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SI2} → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 FA_{SI3} → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi) solo per il contesto di pianura;

8.7 Carta della distribuzione dei valori di H_{SM}

Le mappe di pericolosità sismica denominate <<Carta della distribuzione dei valori di H_{SM}>> sono anch'esse elaborate a diversa scala di dettaglio (1:10.000 per la pianura e 1:5.000 per la

collina) e riportano i valori di H_{SM} (Naso et al., 2019) per gli areali interessati dalla microzonazione sismica.

Si rammenta che il valore di H_{SM} rappresenta un parametro di pericolosità che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2) come riportato nel paragrafo 7.3.

9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G. (2004): Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna-SGSS, CNR-IGG. SELCA, Firenze.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2018) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1. <https://www.centromicrozonationesismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.
- Comune di Bologna – Quadro Conoscitivo PSC – Il sistema naturale e ambientale – Relazione Tecnica (a cura del geol. A. Fiori, 2008).
- Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*.

Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: *A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. *Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali*, Bologna.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: “La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L’esperienza della regione Emilia-Romagna”. Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) – *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) – *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all’indirizzo: http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833.

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) – *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.–1997) e nell’area Mediterranea (760 a.C.–1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

ISIDe Working Group (2010) – Italian Seismological Instrumental and parametric database. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d’Italia, Fogli 220, 221, 236 e 237*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d’Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma. <https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/emilia.html>.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D’Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019).

Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Bramerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V. Con Il Contributo Di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) – *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

Martelli (2015) – *I terremoti dell'Appennino Bolognese*. La geologia. Nueter, XLI, n. 82, 387–395.

Meletti M., Valensise G (a cura di) (2004) – *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

Ministero delle Infrastrutture (2018) – D.M. 17/01/2018 (G.U. n.42 del 20/02/2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Mucciarelli M. (a cura di) (2012) – *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici. Studi teorici ed applicazioni professionali*. Edizioni Aracne.

Naso G., Martelli L., Baglione M., Bramerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G. (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*, Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.

Pieri M. e Groppi G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Provincia di Bologna – *Variante al PTCP in materia di riduzione del rischio sismico. Adeguamento alla L.R. 19/2008*. 2013.

RER – ENI, Agip (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia–Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia–Romagna, ENI Agip Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.

Martelli L. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia–Romagna e aree limitrofe. Con note illustrative*. Regione Emilia–Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia.

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse – *Università degli Studi di Firenze – INGV – Carta sismotettonica della Regione Emilia–Romagna e aree limitrofe (2017) – scala 1:250.000*.

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia–Romagna – cartografia interattiva consultabile on line:

https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss.

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.19/2008 – *“Norme per la riduzione del rischio sismico, con le modifiche apportate dalla L.R. 6 luglio 2009, n.6 “Governo e riqualificazione solidale del territorio”*. BURER n. 184 del 30/10/2008.

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.24/2017 – *“Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”*. BURERT n. 304 del 21/12/2017.

Regione Emilia Romagna – *Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell’atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia–Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”*. BURER n. 64 del 17 maggio 2007.

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 – “Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell’atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia–Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell’Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112”*. BURER n. 4 del 8 gennaio 2016 parte seconda.

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.630/2019 – “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017”*. BURER. n. 143 del 6 maggio 2019 parte seconda.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (2019). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>.