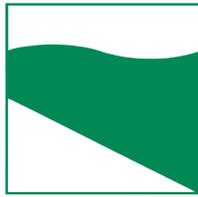




PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



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 Castenaso



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA		
Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPDC 675/2020 recepita con DGR 1238/2020	Dott. geologo Samuel Sangiorgi	Marzo 2023

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.....	10
2.4	Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV.....	11
2.5	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	12
2.5.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....</i>	<i>12</i>
2.5.2	<i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitan di Bologna.....</i>	<i>14</i>
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	17
3.1	Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico.....	17
3.2	Geomorfologia storica.....	22
3.3	Idrogeologia.....	26
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	29
4.1	Indagini pregresse.....	29
4.2	Le nuove indagini eseguite.....	30
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	34
5.1	Sottosuolo profondo.....	34
5.2	Litologie sub-affioranti.....	42
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	45
6.1	Commenti introduttivi.....	45
6.2	Definizione del substrato rigido.....	45
6.3	Delimitazione delle zone di attenzione.....	46
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS.....	51
7.1	Cenni introduttivi.....	51
7.2	Sintesi illustrativa delle MOPS.....	51
7.3	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	53
7.4	Calcolo dei fattori di amplificazione.....	54
7.4.1	<i>Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.....</i>	<i>54</i>
7.4.2	<i>Zone di attenzione per instabilità.....</i>	<i>55</i>
7.5	Elaborazione dei valori di Hazard (HSM).....	56

8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	58
8.1	Carta delle Indagini (tavola 1).....	58
8.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica (tavola 2).....	58
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavola 3).....	59
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (tavola 4).....	59
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5).....	61
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 2 (tavole da 6 a 13).....	62
8.7	Carta della distribuzione dei valori di H (tavola 14).....	63
9	BIBLIOGRAFIA.....	64

1 INTRODUZIONE

1.1 Contenuti dello studio

Il Comune di Castenaso ha beneficiato di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione degli studi comunali di microzonazione sismica di “livello 2” e per le 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. 675/2020, recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1238/2020. Lo studio di MS e le analisi della CLE sono stati affidati dall’Amministrazione comunale allo Studio scrivente.

Si sono dunque espletate le seguenti attività:

- la raccolta dei dati geognostici e geofisici di repertorio;
- l’esecuzione di ulteriori indagini geognostiche/geofisiche;
- l’elaborazione delle analisi di “livello 1” su tutto il territorio comunale;
- la microzonazione sismica di “livello 2” per il territorio urbanizzato e per un’ulteriore fascia di territorio circostante, comprendente anche la viabilità di connessione definita dall’analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE);
- l’elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE);
- l’archiviazione dei dati e la redazione delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

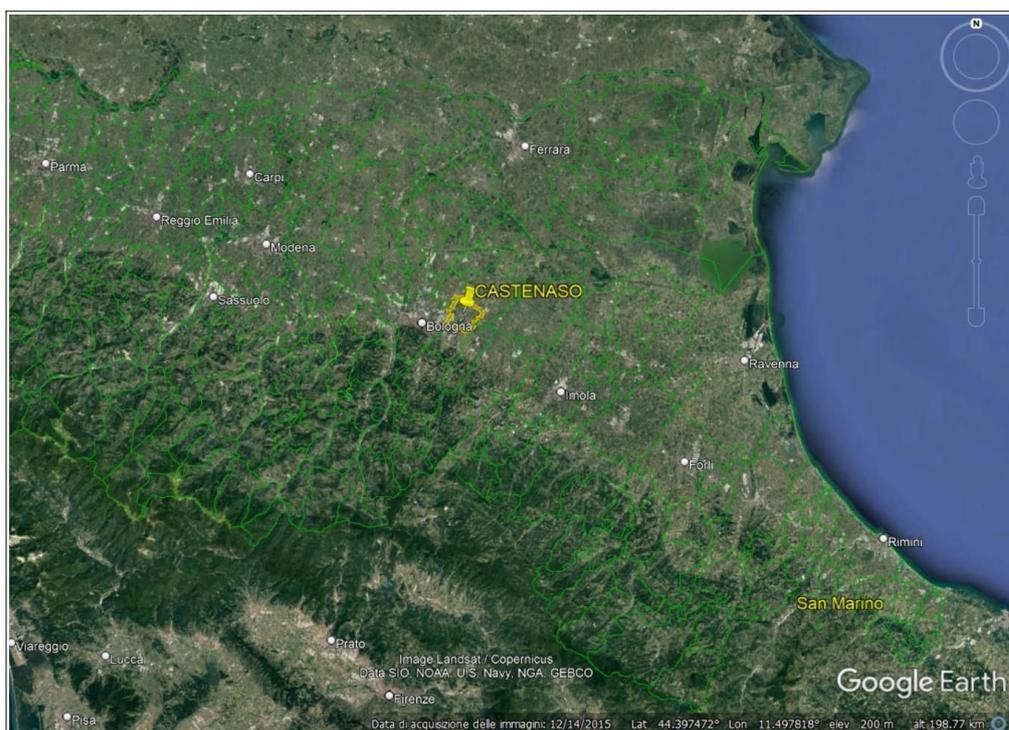


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio comunale di Castenaso evidenziato in giallo (Foto aerea: “Google Earth”)

La figura 1.1 localizza il limite comunale di Castenaso: si tratta di un territorio amministrativo ricadente nella pianura padana a NE di Bologna, di estensione areale totale pari a circa 35,7 kmq e con una popolazione di 15.895 abitanti (dato ISTAT 01/01/2022).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio il territorio interessato dallo studio di microzonazione sismica. La disponibilità di informazioni ha consentito di estendere lo studio di MS di primo livello a tutto il territorio amministrativo.

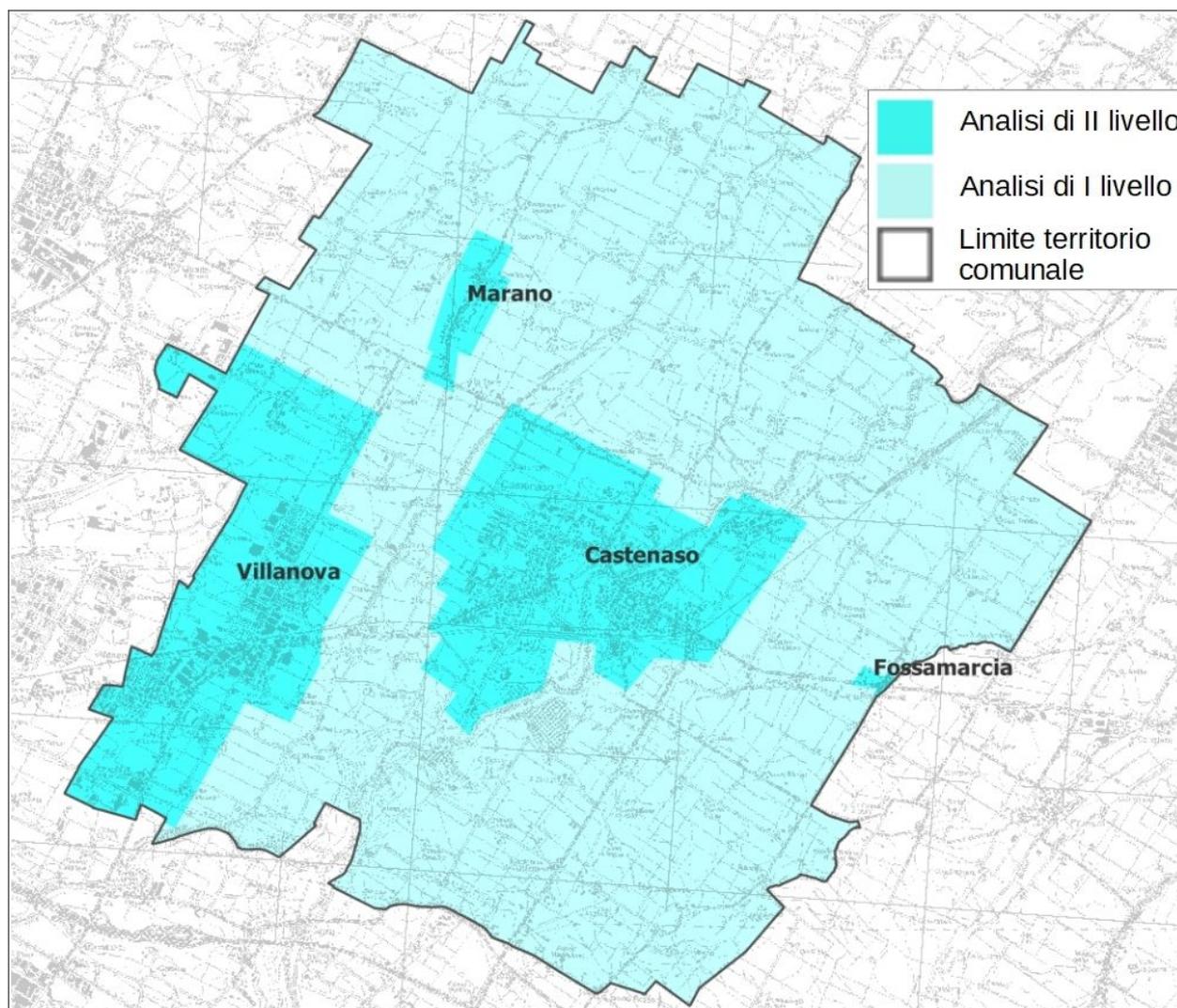


Figura 1.2 – Estensione del territorio comunale interessato dagli studi di microzonazione sismica (base topografica Regione Emilia-Romagna - CTR 1:25.000)

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 tuttavia rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, dicembre 2020), da qui in avanti “Standard CTMS 4.2”;
- ✓ “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 “indirizzi ICMS”.

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative e indirizzi attualmente vigenti :

- ✓ 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, LR n. 24/2017)”
- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 476/2021 (testo coordinato con le modifiche introdotte dalla DGR n. 564/2021) “Aggiornamento dell’Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017) di cui alla alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630”
- ✓ LR N. 19/2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- ✓ LR N.24/2017 “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 Castenaso 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;

- i report (riprodotti in formato *.pdf) delle indagini geognostiche/geofisiche eseguite per questo studio, contenuti nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavole 1	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavole 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavole 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavole 4	1:10.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavole 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 3 – FA _{PCA}	Tavole 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA1}	Tavole 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA2}	Tavole 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA3}	Tavole 9	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA4}	Tavole 10	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{S11}	Tavole 11	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{S12}	Tavole 12	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{S13}	Tavole 13	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H – H _{SM}	Tavole 14	1:10.000

Tabella 1.1 – Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Castenaso

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 1238/2020 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard CTMS, attualmente aggiornati alla versione 4.2 (dicembre 2020), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Sono inoltre coerenti con Indirizzi regionali contenuti nella DGR 476/2021.

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 2020. 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 CTMS.

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 versione 4.0 – Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani* (Rovida et al., 2022; <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 1000–2020;
- il *DBMI15 versione 4.0 – 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 1000–2020 (Locati et al., 2022 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>);
- il *CFTI5Med – 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 *Mapa 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 (ag) 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 3.3.0* (DISS Working Group, 2021), 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., 2022), riporta per il Capoluogo 14 eventi sismici, con moderati effetti macrosismici storicamente riscontrati, che arrivano fino al grado V–VI della scala MCS (Sieberg, 1930). La figura 2.1 riporta una mappa di sintesi degli effetti macrosismici stimati a seguito di

eventi sismici nella Regione Emilia-Romagna (settore orientale). La figura 2.2 riporta l'elenco dei terremoti più significativi che hanno interessato il Capoluogo comunale (fino al 2020) e il grafico della distribuzione temporale degli eventi con massima intensità ≥ 2 , stimata sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione.

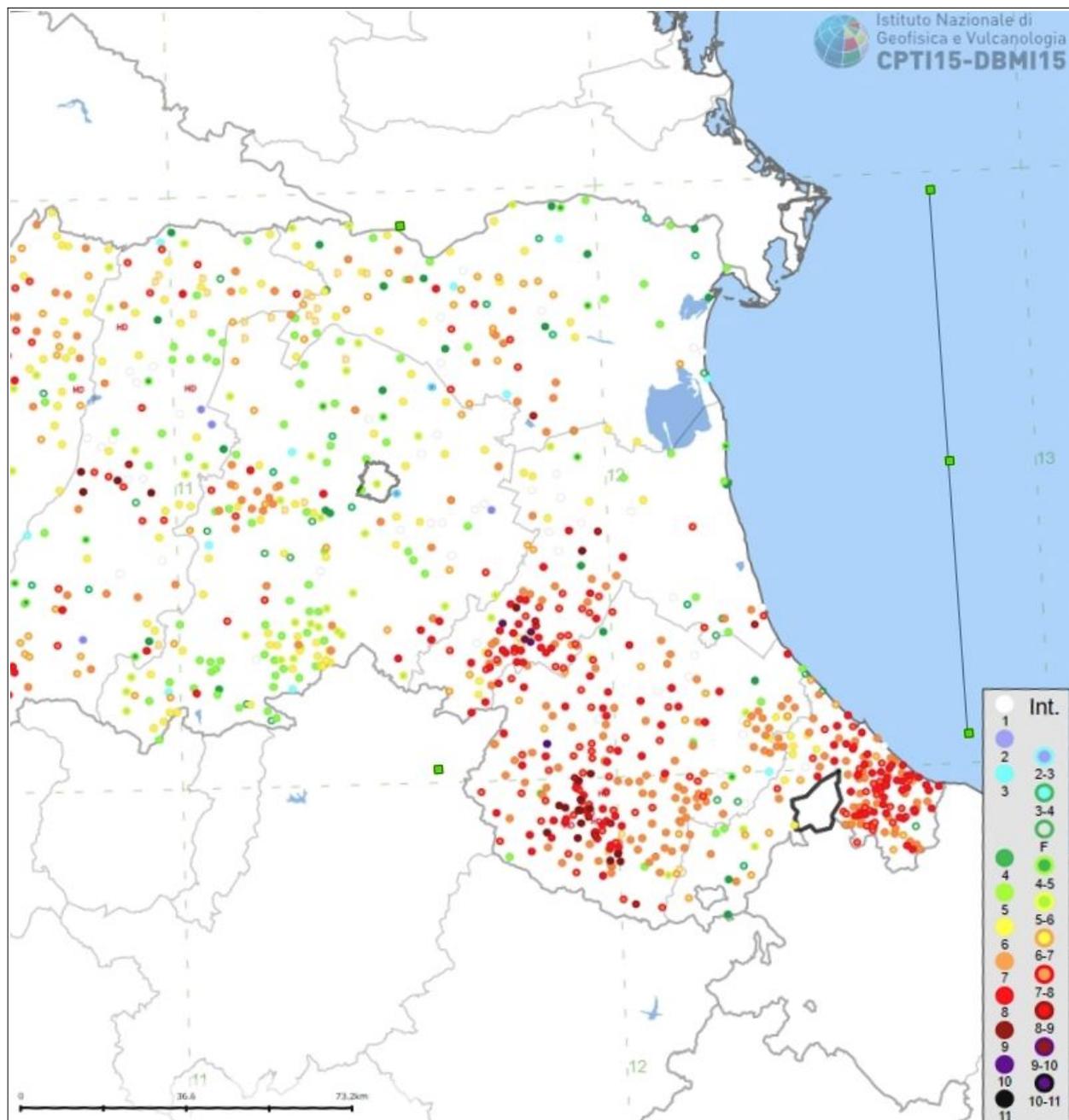


Figura 2.1- Massime intensità macrosismiche registrate nella Regione Emilia-Romagna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Castenaso

Il DBMI15 riporta 2 eventi con intensità stimata fino a 5-6, relativi allo sciame sismico che ha interessato il bolognese nel 1929. La figura 2.3 riporta invece la localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi che hanno interessato il territorio studiato (fonte: archivio DBMI15).

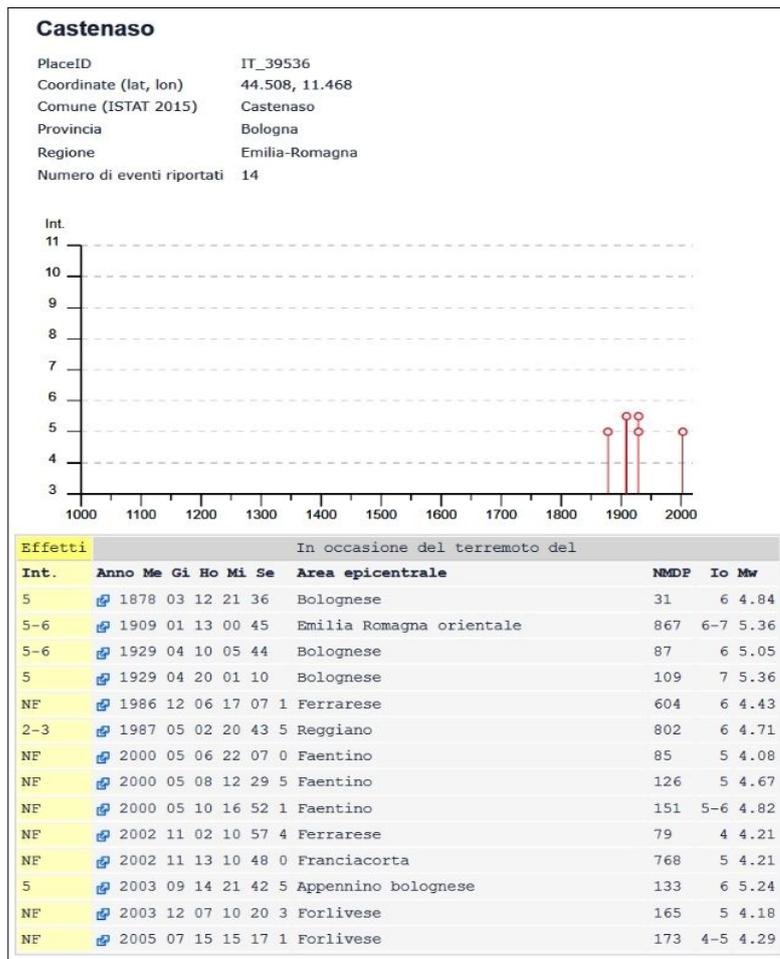


Figura 2.2- Terremoti significativi per il Capoluogo, con macrointensità stimata ≥ 3 e plottaggio cronologico degli eventi con macrointensità stimata ≥ 2 (fonte: INGV - DBMI15)

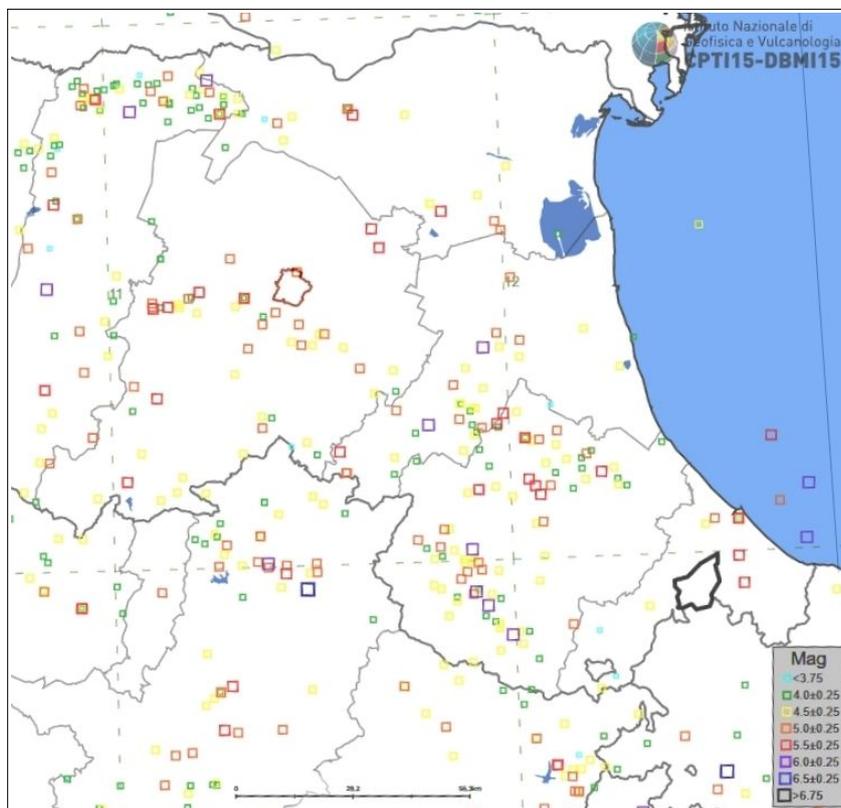


Figura 2.3 - Localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi registrati nel territorio della Città Metropolitana di Bologna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Castenaso

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).

I maggiori effetti locali riscontrati sono riconducibili ad amplificazione del moto sismico e a 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 2.4 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

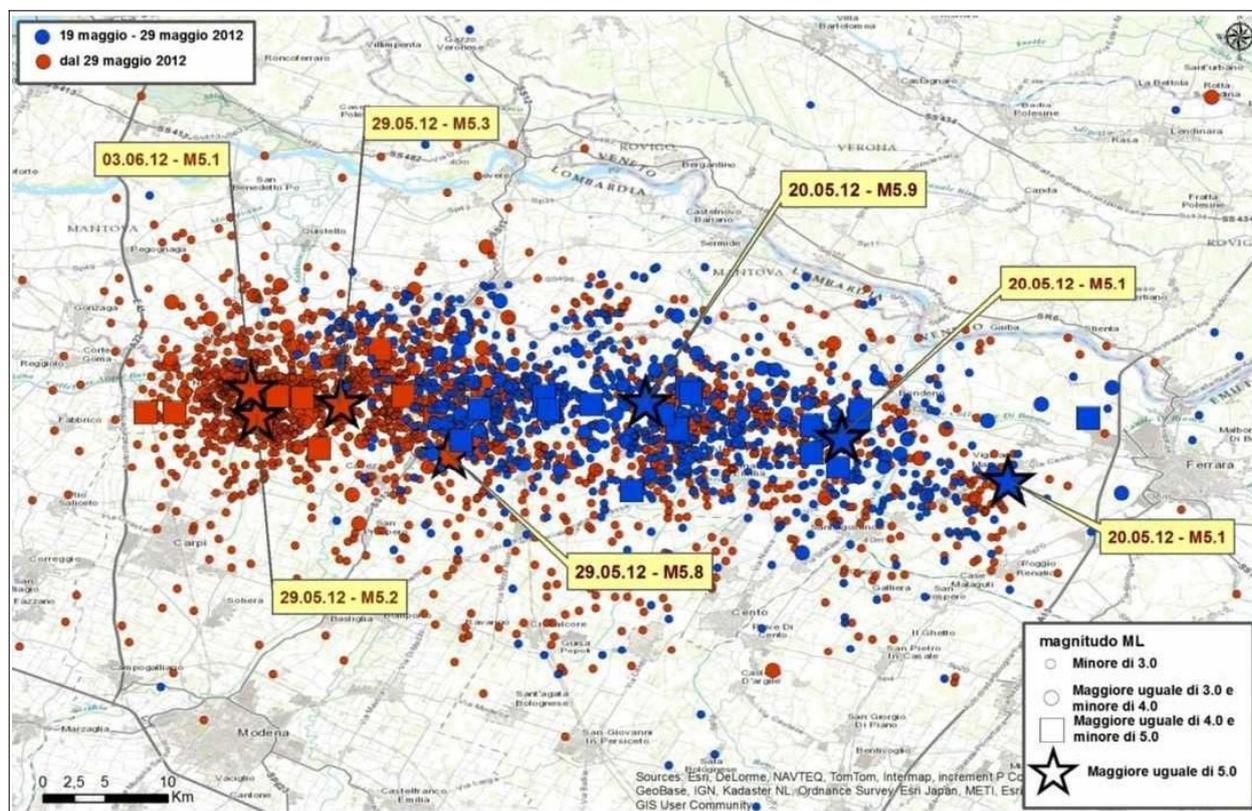


Figura 2.4 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

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

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.

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) non attribuisce nessun valore di intensità riferibile al sisma emiliano 2012 per le località comprese nel territorio di Castenaso, in quanto i rapporti sui rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano solo i Comuni più settentrionali della 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), il territorio comunale ricade nella Zona 912, caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6.14.

La figura 2.5 riporta una sovrapposizione del Comune di Castenaso con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS v. 3.3.0 (DISS Working Group, 2021). Questo fondamentale database specifica le seguenti sorgenti sismogeniche composite, che tuttavia ricadono esternamente al territorio studiato (non interessato storicamente da epicentri sismici di intensità significativa):



Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.3.0). Foto aerea: Google Earth

- la <<ITCS047 - Castelvetro di Modena - Castel San Pietro Terme>> che interessa i territori appenninici e pedeappenninici situati poco a sud rispetto al territorio di Castenaso, con una magnitudo stimata di $Mw = 6,0$ e derivata dai terremoti più significativi bolognesi (1505 e 1929) e modenese (1399). La più vicina sorgente

sismogenica individuale nota è denominata “ITIS091 – Casalecchio di Reno” a cui è attribuita una $M_w = 5,5$ associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004); la zona epicentrale di quest’ultimo sisma 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);

- la <<ITCS012 – Malalbergo–Ravenna>> è distante circa 13 km a nord del territorio di Castenaso ed è caratterizzata da una Magnitudo M_w max pari a 6,0. In sintesi, la sismicità è legata al fronte compressivo avanzato sepolto (pieghe ferraresi esterne), con terremoti storici (Boschi et al, 2000;. Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al, 2006; Guidoboni et al, 2007) che raramente hanno raggiunto elevate intensità e tuttavia con profondità relativamente modeste. La magnitudo della zona è infatti derivata dalle magnitudo massime attribuite ai terremoti più significativi associati a questa zona (Classe–Ravenna,725; Argenta, 1624; bassa padana, 1796 e 1909). Le massime profondità ipocentrali che possono caratterizzare tale area si basano su considerazioni tettoniche (da 2 a 8 km circa);
- la <<ITCS051 – Carpi–Poggio Renatico>> è anch’essa situata a circa 13 km a nord-ovest del territorio comunale, questa fascia sismogenetica interessa la pianura bolognese di nord orientale ed è caratterizzata da una Magnitudo M_w max pari a 6,0. Anche per questa sorgente composita, la sismicità locale è data prevalentemente dall’attività delle faglie compressive delle “Pieghe Ferraresi” (Pieri & Groppi, 1981): questo sistema di pieghe–faglie ha dato origine alle due principali dorsali sepolte (“interne” ed “esterne”) che descrivono un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spingono fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990). Queste dorsali sepolte, sono il risultato dell’attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio–superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud. Di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (Martelli, 2014). Gli eventi sismici della pianura emiliana del 2012 sono risultati la conseguenza della riattivazione di un segmento di questa sorgente sismogenetica.

2.5 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale

2.5.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica

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 redatti 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 successive DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Queste revisioni hanno considerato come ulteriore 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");
- ✓ nell'introduzione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner SI3 (per l'intervallo di periodo T compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- ✓ nell'introduzione dei fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale SA1, SA2, SA3, SA4 (per intervalli di periodo T rispettivamente di 0,1–0,5s, 0,4–0,8s, 0,7–0,11s, 0,5–1,5s);
- ✓ nella definizione dell'input sismico ($a_{g,ref}$ al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a 0,05° (mappa MPS04) in analogia con quanto previsto per le NTC 2008);
- ✓ 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 ultimi aggiornamenti agli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno infine riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di terzo livello.

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").

Per quanto riguarda la a_g al sito di riferimento ($a_{g,ref}$), la figura 2.6 riporta per il territorio comunale di Castenaso i punti della griglia INGV e i relativi valori di a_{refg} (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 comunale i valori di a_{refg} (per terremoti con $TR = 475$ anni) sono compresi tra circa 0,176g e 0,169g, con una variabilità relativamente modesta della pericolosità “di base”, in diminuzione verso N-NO.

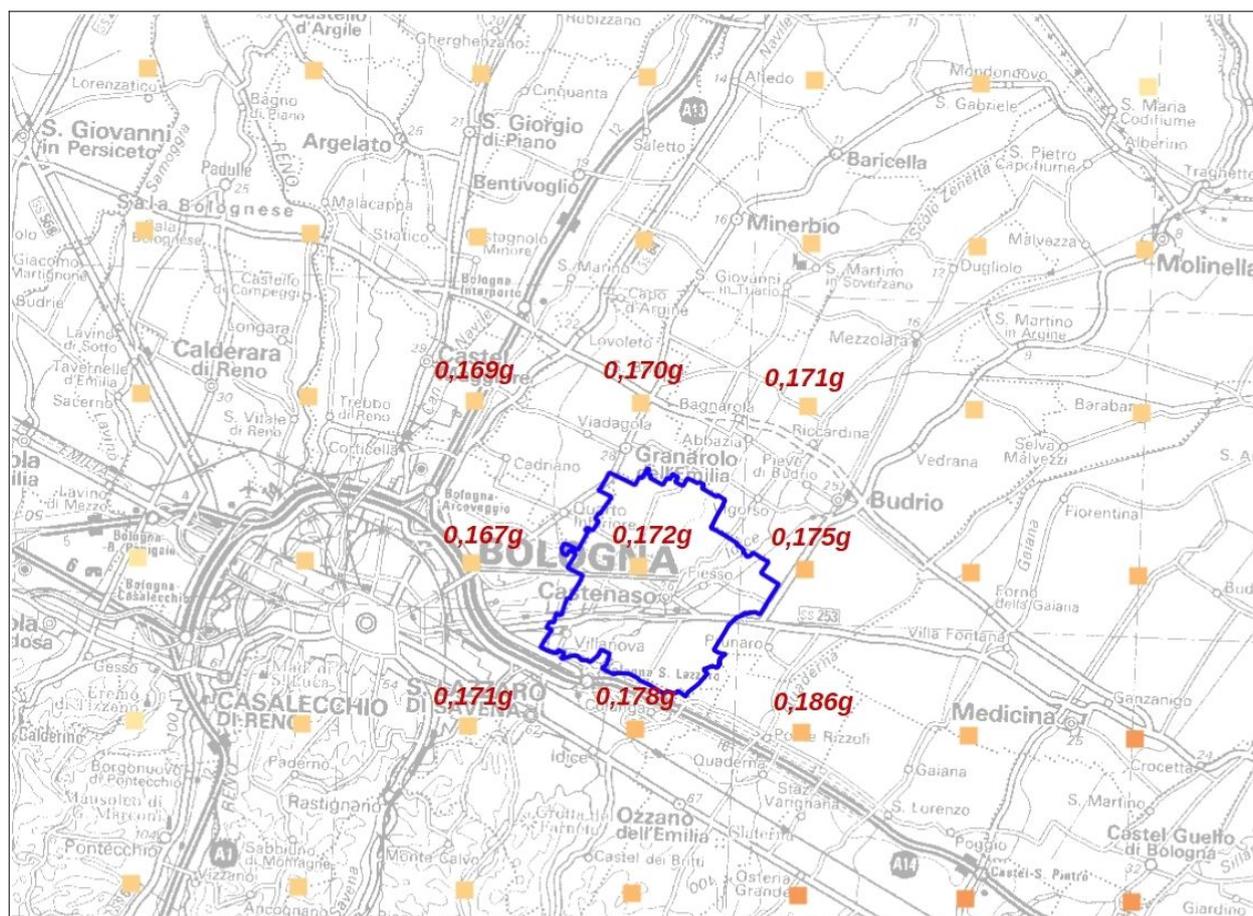


Figura 2.6 - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Castenaso

2.5.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna

La Città Metropolitana di Bologna ha provveduto all'aggiornamento³ degli studi di pericolosità sismica preliminare dell'intero territorio amministrativo, ai sensi della DGR n.630/2019. Gli esiti di tali studi sono stati assunti nella proposta di piano e in particolare è stata redatta la

³ aggiornamento dei contenuti della <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>> approvata con Delibera del Consiglio Provinciale del n°57 del 28/10/2013

<<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> (alla scala 1:65.000 per la pianura), che:

- costituisce un primo livello di approfondimento e identifica le condizioni geologiche e morfologiche che possono determinare effetti locali sulla base dei quali è possibile definire potenziali scenari di pericolosità sismica locale;
- fornisce come ulteriore dato conoscitivo le isobate del tetto del substrato rigido, i limiti e le isobate dei depositi grossolani di conoide sepolta in grado di condizionare la risposta sismica locale;
- permette di operare una prima distinzione delle aree sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e, per ciascuna tipologia di esse, vengono indicate le indagini e/o le analisi di approfondimento che devono essere effettuate dagli strumenti di pianificazione successivi (figura 2.7).

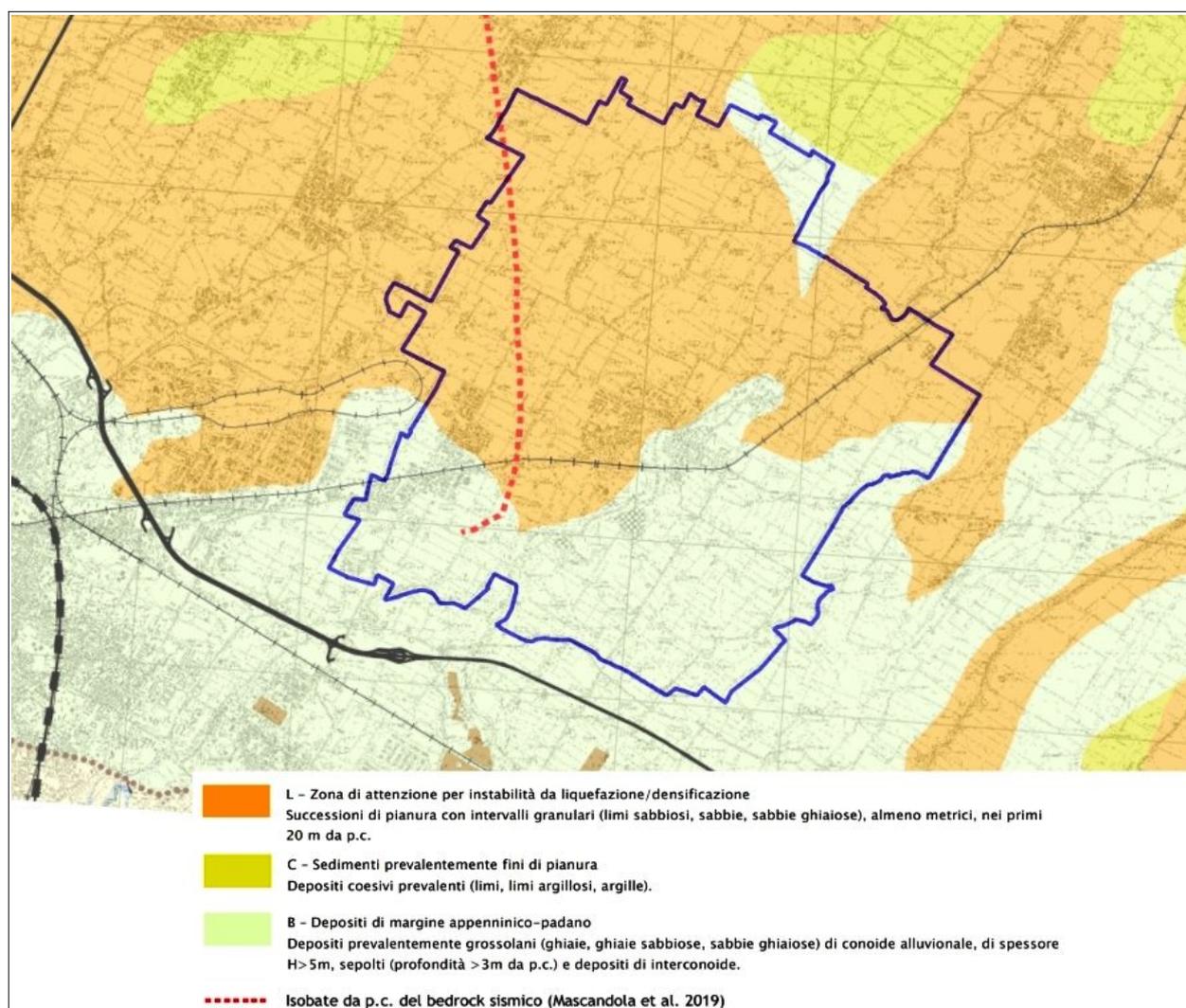


Figura 2.7 - Stralcio del foglio 1 della tavola <<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> alla scala 1:65.000 (PTM di Bologna – Proposta di piano, luglio 2020). È riportato il perimetro del territorio comunale di Castenaso

Secondo la cartografia del PTM, il territorio comunale più settentrionale di Castenaso ricade in un contesto di potenziale propensione alla liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri. Il territorio comunale meridionale ricade, invece, in un contesto di sottosuolo che può risultare caratterizzato da depositi prevalentemente grossolani (da ghiaie a sabbie-sabbie ghiaiose di spessore >5 metri, oppure caratterizzato da depositi prevalentemente fini di interconoide. Nel settore meridionale, pertanto, la risposta sismica locale può essere maggiormente differenziata per la presenza di possibili riflettori sismici poco profondi (spessori granulari più addensati).

3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico

Dal punto di vista tettonico, il territorio di Castenaso si colloca in zona di “fronte” appenninico sepolto nella Pianura Padana (AGIP 1977, 1981, 1982; Boccaletti et al., 1985, 1987; Bally et al., 1986; Castellarin & Vai, 1986; Castellarin et al., 1992; Pieri, 1992; ecc.), che costituisce la propaggine più settentrionale della catena appenninica e che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano veneta (Boccaletti et al., 2004). Tale fronte sepolto è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi (M. Pieri & G. Groppi, 1981).

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. 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).

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.

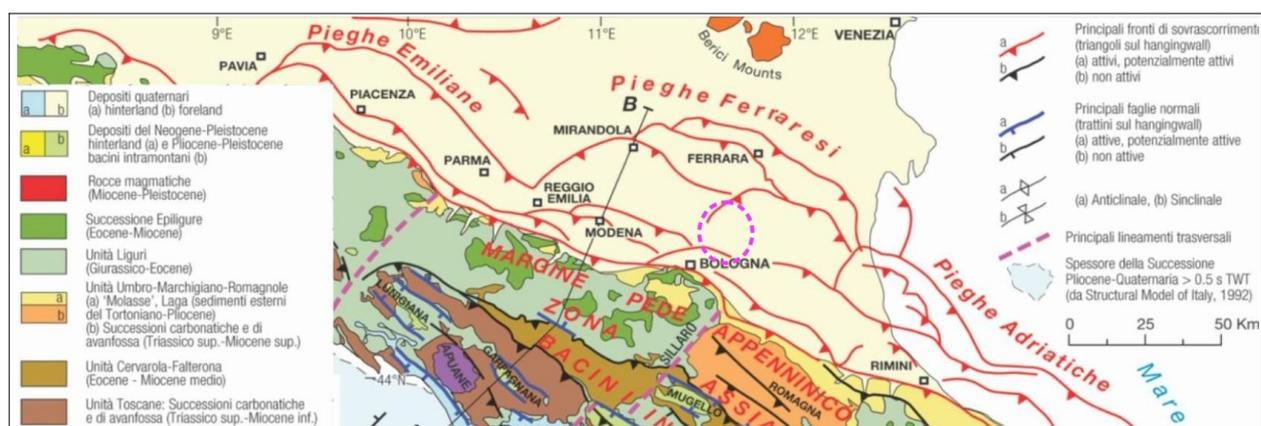


Figura 3.1 – Ulteriore schema strutturale tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016). L'area di studio è localizzata nel cerchietto fucsia

La figura 3.1 presenta uno schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016). La figura 3.1 conferma come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il

limite dell'appennino affiorante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.

Il territorio di Castenaso ricade al margine meridionale della blanda sinclinale compresa tra le “Pieghie Pedeappenniniche” (a sud e più prossimali alla catena appenninica) e il settore orientale dalla “Dorsale Ferrarese Interna”; quest'ultima è un'ampia struttura anticlinale nord-vergente estesa tra Reggio-Emilia e la costa adriatica, caratterizzata da un massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, noto anche come Alto di Mirandola”.

Nell'area di studio, le strutture tettoniche del fronte appenninico sono sature da depositi di età più recente (coltre alluvionale del Quaternario), sovrapposti ai depositi marini plio-pleistocenici (figura 3.2).

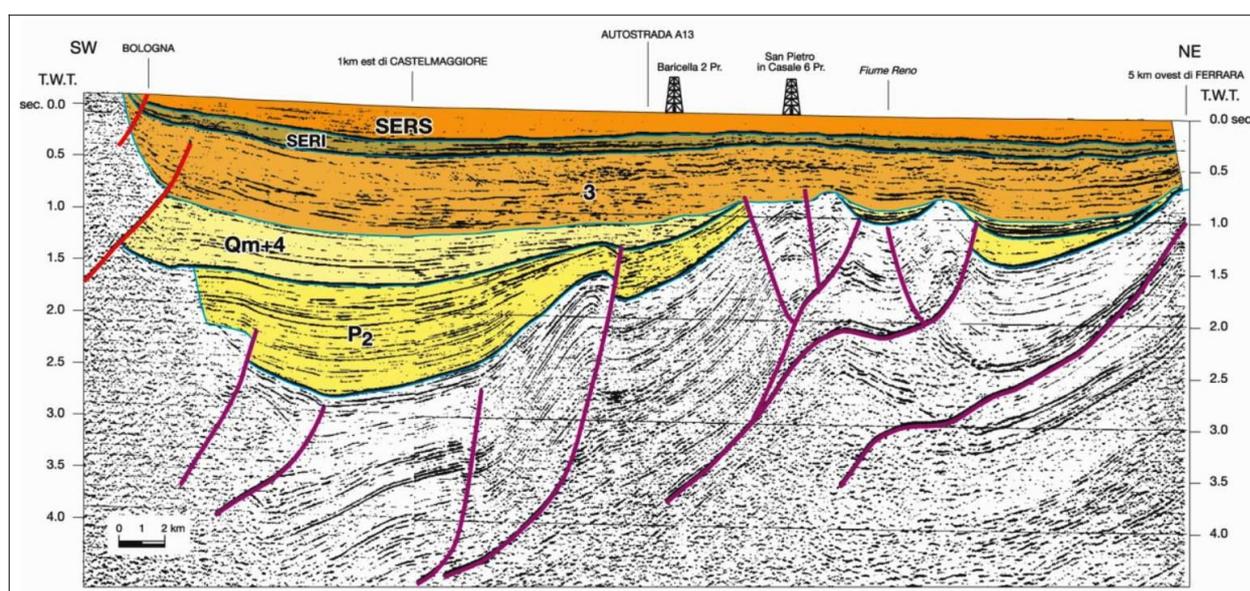


Figura 3.2 - Profilo sismico rappresentativo del territorio di pianura, da Bologna a Ferrara (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe - ed. 2016)

La coltre alluvionale è prevalentemente caratterizzata da alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille (in funzione delle evoluzioni delle facies deposizionali dominanti), di età Pleistocene medio-Olocene e principalmente attribuibili ai corsi d'acqua Savena e Idice.

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 3.3.

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

- “Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore” (SERI o AEI), che costituisce lo spessore di alluvioni più profonde e sovrapposte ai depositi marini plio-pleistocenici;
- il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS o AES).

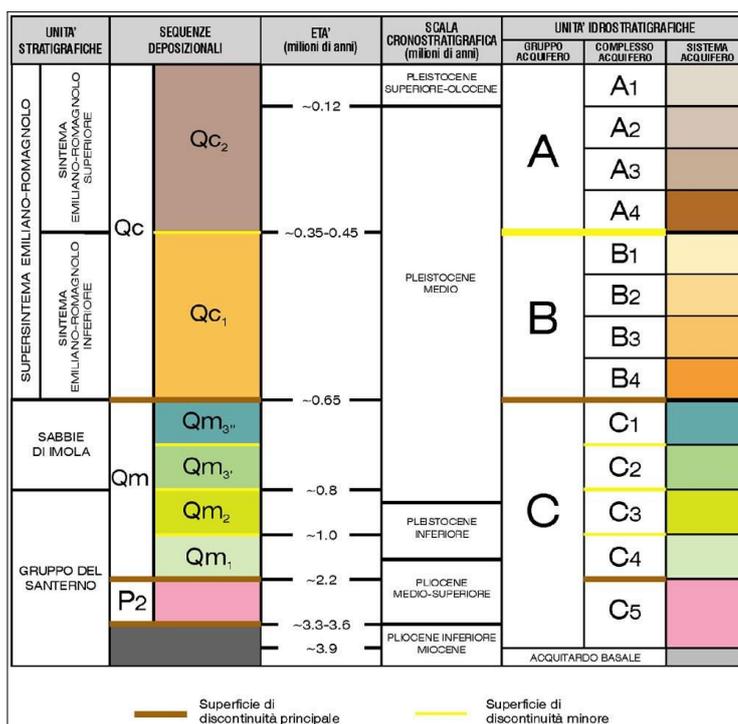


Figura 3.3 – Schema stratigrafico dei depositi plio – quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (RER & ENI-AGIP, 1998)

All'interno del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS) sono classificate unità di range inferiore (subsistemi) e costituiti da alternanze cicliche di depositi fini (argille e limi) riferibili a facies deposizionale di piana alluvionale e depositi prevalentemente sabbiosi riferibili a barre/canali/argini fluviali.

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) hanno evidenziato come, nelle aree di sinclinale, la coltre alluvionale superi anche i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale si hanno potenze decisamente inferiori ai 100 metri.

In sintesi, le unità stratigrafiche alluvionali di interesse per l'area di studio sono le seguenti (dal basso verso la superficie):

SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE (AEI) → nelle stratigrafie di sottosuolo di questo settore della pianura, il limite inferiore dei depositi AEI viene posizionato in corrispondenza del contatto netto fra i depositi fluvio-deltizi basali del supersistema ed i depositi sabbioso-ghiaiosi litorali e di delta-conoide riferiti al tetto delle Sabbie di Imola (IMO). L'età di questi depositi è attribuita al pleistocene medio (0,70-0,75 Ma → 0,40-0,45 Ma).

SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE (AES) BASALE INDIFFERENZIATO → Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale e subordinatamente deltizio e costiero. Il contatto basale risulta più marcato verso nord, con maggiori contrasti di facies tra depositi sabbiosi fluvio-deltizi e di piattaforma di AEI con i depositi più fini di piana alluvionale e deltizia di AES.

SUBSISTEMA DI BAZZANO (AES6) → Questi depositi sono stati correlati nel sottosuolo (su base geometrica) con i depositi grossolani sommitali di un ciclo trasgressivo - regressivo. I depositi

di questo ciclo hanno varie decine di metri di spessore e poggiano in contatto netto sulle ghiaie e sabbie di canale fluviale del ciclo sottostante. La base del ciclo è costituita da depositi fini alluvionali, talora sostanza organica, di origine palustre, passanti a depositi costituiti da alternanze di sabbie e ghiaie limose, limi sabbiosi, limi e argille di argine, rotta e piana inondabile. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile. La parte superiore è data da sedimenti prevalentemente sabbiosi di canale fluviale in corpi lateralmente estesi di spessore fino a 20 metri circa e caratterizzati da contatti netti ed erosivi sui depositi sottostanti.

L'unità è chiusa al tetto da depositi argillosi di piana alluvionale e palude del ciclo sovrastante. Età deposizionale: Pleistocene medio (circa 230.000–130.000 anni).

SUBSISTEMA DI VILLA VERRUCCHIO (AES7) → La porzione basale trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale e piana inondabile contenenti livelli metrici di argille e limi localmente ricchi di sostanza organica di origine palustre. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile dove sono frequenti livelli pedogenizzati (paleosuoli). La porzione sommitale del ciclo è caratterizzata da più frequenti depositi granulari che nel territorio comunale di Castenaso sfumano da ghiaioso sabbiosi (nel settore centro-meridionale) a sabbiosi di canale/argine fluviale e a geometria prevalentemente nastriforme (nel settore settentrionale) e principalmente attribuibili al corso d'acqua Idice).

Lateralmente, questi depositi grossolani di canale fluviale passano a depositi fini di tracimazione fluviale pedogenizzati. Il limite di tetto di AES7 è ricoperto dai depositi trasgressivi, prevalentemente organici di piana alluvionale, del subsistema sovrastante (AES8). Età deposizionale: Pleistocene superiore (circa 125.000–18.000 anni).

SUBSISTEMA DI RAVENNA (AES8) → Si tratta di un'unità relativamente superficiale e con spessore massimo di circa 20 metri, ed è perciò particolarmente investigata (anche per l'intero spessore) da molte indagini geognostiche. L'età deposizionale è compresa tra circa 14.000 anni e l'attuale, corrispondente alla fase di rapida risalita eustatica e di miglioramento climatico che si sviluppa a partire dal tardo Pleistocene fino a tutto l'Olocene.

In questo subsistema è stata distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'UNITÀ DI MODENA (AES8a) la quale contiene i depositi più superficiali e più recenti, compresi quelli attualmente in evoluzione. AES8a è un'unità di pochi metri di spessore, che raggiunge i 10 m solo localmente, in corrispondenza dei dossi fluviali. Nella cartografia geologica RER, la sub unità AES8a consiste in depositi di tracimazione fluviale, all'interno dei quali è possibile distinguere depositi da sabbioso-ghiaiosi a limoso sabbiosi di canale/argine/rotta fluviale dai depositi più argillosi e limosi di piana inondabile. La base di AES8a è individuata dal contatto in discontinuità delle sue tracimazioni fluviali sul suolo di epoca romana o più antica di AES8.

Nel territorio comunale di Castenaso i depositi alluvionali sub affioranti sono prevalentemente attribuibili all'unità AES8 (figura 3.4), con limitati settori adiacenti il corso d'acqua Idice attribuibili ai depositi sabbioso limosi di tracimazione più recente AES8a.

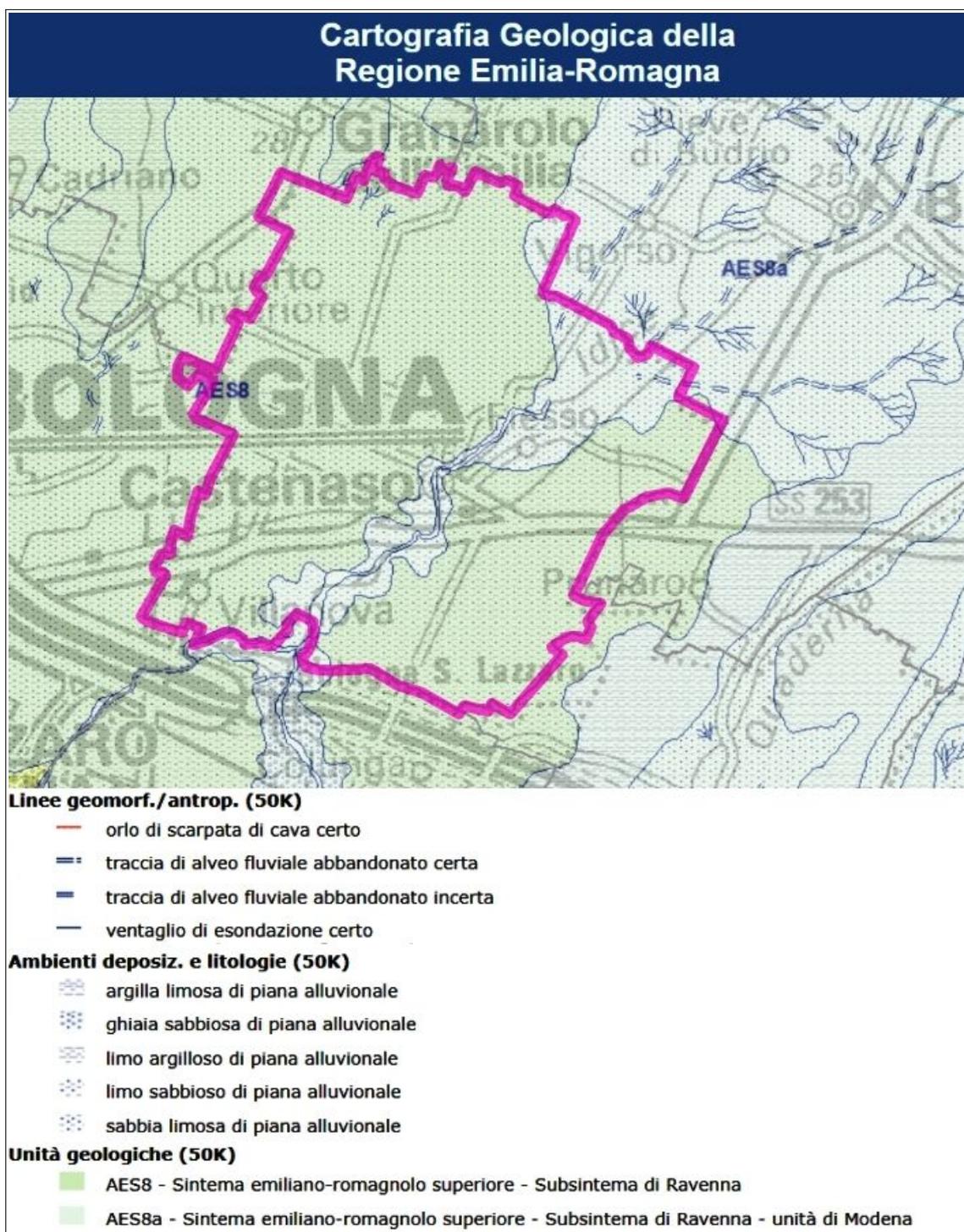


Figura 3.4 – Geologia di sintesi del territorio comunale di Castenaso (fonte: cartografia geologica interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale)

3.2 Geomorfologia storica

L'evoluzione della pianura olocenica è riconducibile ad un modello semplice, almeno nelle linee generali. I corsi d'acqua appenninici a valle delle conoidi pedemontane, poco attive durante l'Olocene (ultimi 15.000 anni), oggi prevalentemente in erosione, tendono a proseguire verso il collettore principale su alvei pensili, formati da sedimenti che il corso d'acqua non è più in grado di portare in carico.

Nel caso di rotte e tracimazioni, in natura frequente, le acque invadono la pianura circostante depositando dapprima i sedimenti più grossolani nelle vicinanze dell'alveo, più lontano i sedimenti più fini (limi sabbiosi e limi) e nelle conche morfologiche, ove le acque possono rimanere a lungo e decantare, si depositano limi argillosi ed anche argille.

A seconda delle condizioni di drenaggio locale le acque possono permanere per tempi più o meno lunghi nelle aree esondate, fino a formare paludi e laghi permanenti, presupposto alla formazione di potenti depositi di argille di decantazione e torbe.

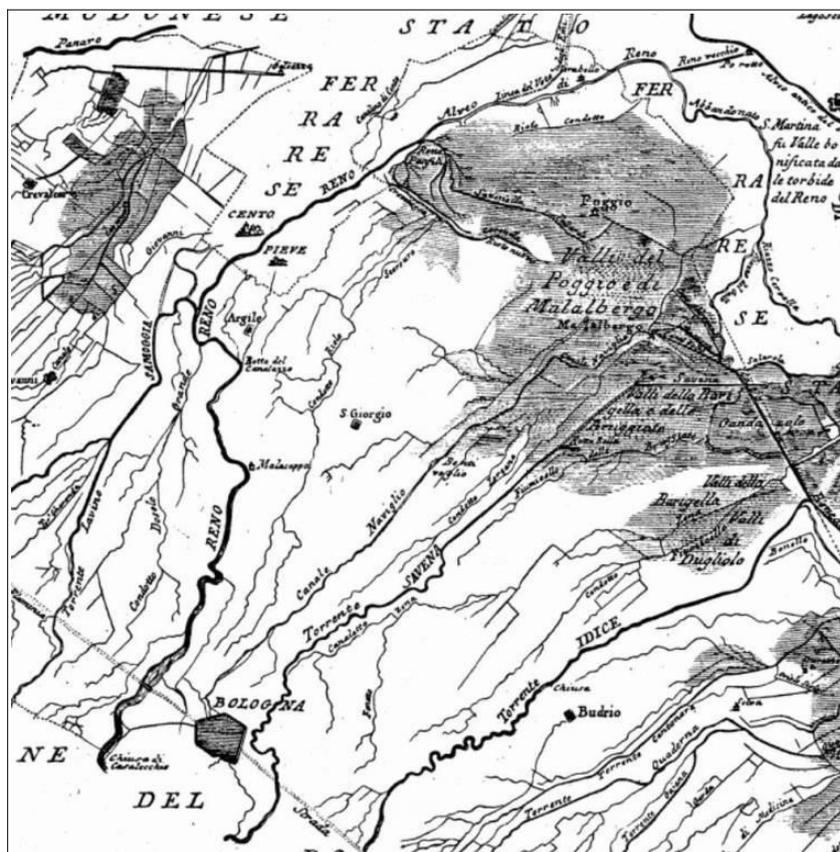


Figura 3.5 - Stralcio di cartografia risalente al 1761 che riporta la delimitazione delle "valli" distribuite a ridosso del Reno e del Po di Primario (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol G. Viel, 2007)

Per corsi d'acqua di pianura non arginati artificialmente, rotte e tracimazioni sono un fenomeno ricorrente che crea le condizioni per modifiche e divagazioni dell'alveo, ciò avviene con frequenza assai alta nei bacini subsidenti che caratterizzano la pianura padana. La velocità di subsidenza naturale condiziona la velocità di accrezione verticale, ma la sua variazione geografica condiziona anche la distribuzione spaziale dei corsi d'acqua.

La distribuzione delle litologie di superficie e del primo sottosuolo, così come l'assetto

morfologico della pianura, sono quindi strettamente legati ai processi strutturali e di sedimentazione e alla loro disposizione nel tempo. La figura 3.5 riporta una ricostruzione geografica della pianura bolognese attorno al 1760: la presenza di vaste aree occupate da zone di espansione dei corsi d'acqua superficiali (paludi, acquitrini stagionali) testimonia delle difficoltà di drenaggio connesse all'evoluzione geostrutturale profonda della pianura ed alla presenza dei rilievi costituiti dai depositi sabbiosi (argini naturali) dei maggiori fiumi: Reno e Po di Primaro.

Questo vasto sistema di zone umide è stato oggetto delle bonifiche che si sono succedute fino a produrre l'assetto attuale della pianura, assetto caratterizzato dalla "pensilità" dei corsi d'acqua, dalla necessità di sollevamento delle acque dei bacini interfluviali per il loro drenaggio, dalla presenza di vaste aree di pianura depressa di forma per lo più ellissoidica (conche morfologiche), ed infine da morfologie allungate nella direzione del drenaggio e topograficamente rilevate sulla restante pianura: gli argini naturali fossili (paleoalvei). Questa ripartizione topografica riproduce la geografia di un passato storico (dal preromano a ciò che si può ricostruire con le cartografie dei secoli scorsi: dall'Atlante Magini, 1620, alle IGMI di primo impianto, 1890).

L'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali a scala regionale è stato condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana. Ciò è dimostrato a scala regionale dallo stesso andamento del fiume Po che, in corrispondenza delle propaggini occidentali delle Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1982), vede deviato il suo corso verso Nord Est: subisce in modo assai vistoso la dinamica degli elementi strutturali ad "arco" paralleli alla catena appenninica. I fiumi minori, affluenti del Po, sono a loro volta condizionati anche dagli elementi secondari trasversali alle grandi pieghe fagliate.

Se le strutture tettoniche profonde hanno influito in modo preponderante, rispetto ad altri parametri, sull'andamento del reticolato idrografico a grande scala della pianura, l'insieme dei parametri climatici ha certamente avuto un ruolo importante nel gioco delle esondazioni, nella formazione delle paludi e soprattutto nella distribuzione temporale degli eventi. Ciò ha naturalmente influito sulla distribuzione locale delle litologie di superficie, soprattutto negli ultimi millenni. In particolare, per gli ultimi 4000 anni gli studi di molti Autori (S. Cremonini, 1980; Cremaschi & Alii, 1980; Veggiani 1985, Ortolani e Pagliuca, 1996) hanno consentito di individuare cicli climatici di piovosità, che si articolano in quattro eventi certi ed uno dubbio:

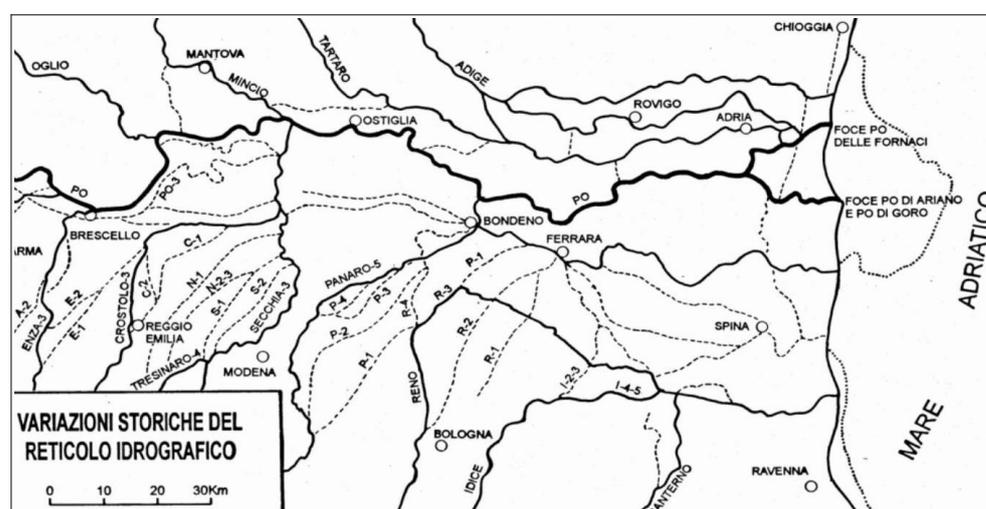
- 1400-1300 a.C.
- 700-300 a.C.
- 400-700 d.C.
- 1150-1350 d.C. (?)
- 1550-1850 d.C.

Questi cicli, associati ai fattori tettonici di cui si è trattato in precedenza, sono stati responsabili di esondazioni e di considerevoli modifiche dell'assetto idromorfologico della pianura fino a tempi a noi vicini.

L'intervento antropico di bonifica che dall'età preromana è andato sempre intensificandosi ha in gran parte modificato e poi interrotto l'evoluzione degli eventi naturali: il reticolato idrografico, via via sempre meno dinamico, risulta ai nostri giorni in pratica cristallizzato.

Dai tempi preromani al XIV secolo, si osserva come principale "trend" evolutivo uno spostamento verso occidente degli assi drenanti provenienti dalle valli del Reno, diretti verso nord per la confluenza nel Po (figura 3.6). Il corso d'acqua Idice pare avere un comportamento opposto: il suo alveo "migra" verso oriente per la confluenza dapprima nel Po e dal XIV secolo nel Reno. Così tra Reno ed Idice va aprendosi un grande spazio che sarà occupato dalle divagazioni dei fiumi minori della collina del pedecollina bolognese. Questa anomalia potrebbe avere una spiegazione strutturale. In tempi romani, il fiume Reno subisce una netta divagazione verso Ovest lungo un alveo Trebbo – S. Giorgio di Piano – S. Pietro in Casale – Ferrara (indicato in figura 3.6 come R2), abbandonando un percorso preromano lungo l'asse Castelmaggiore – Bentivoglio (R1), mentre l'Idice pare mantenersi in asse sul proprio alveo (I1 e I2).

Figura 3.6 - Ricostruzione del reticolo storico del basso Po e dei suoi affluenti di destra realizzata da vari autori (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol G. Viel, 2007)



Questi spostamenti, che pare culminino nell'alto medioevo, è possibile siano stati provocati da una fase di particolare intensità della subsidenza tettonica del modenese, il cui centro è da ubicarsi probabilmente a nord della Via Emilia. Questo processo, sviluppato dal preromano fino al XVII secolo, avrebbe prodotto rotte e nuove divagazioni verso il centro di abbassamento relativo. Osservando la figura 3.6 si nota che allo spostamento dell'asse del Panaro, lungo il tracciato P3, corrisponde la medesima deriva del Reno che occupa un paleoalveo del Panaro abbandonato (R3). L'asta dell'Idice, invece, continua a permanere approssimativamente nella medesima posizione, a testimonianza che lo spostamento degli assi di drenaggio di Reno e Panaro può essere dovuto a processi strutturali localizzati e non di "basculaggio" generale della pianura.

L'Alto medioevo coincide con un regime pluviale piuttosto abbondante ed è associato a fenomeni di generale innalzamento degli alvei, con difficoltà di scolo e di drenaggio: ciò comporta la formazione di grandi aree palustri con ristagni d'acqua, sottoposte a bonifica intensiva solamente nei secoli più vicini a noi.

Dopo i grandi dissesti idrogeologici del periodo alto medioevale, che provocarono rotte e imponenti cambiamenti di corso dei fiumi nei loro tratti di pianura, ricerche climatologiche ritengono che si instauri un optimum climatico dal 800 d.C al 1200 d.C per tornare poi ad un

nuovo deterioramento.

L'ampia area compresa tra il Reno e l'Idice costituisce l'ambito in cui si attua l'inversione delle direzione tendenziale delle divagazioni d'alveo, ed è solcata da numerosi alvei minori. La storia evolutiva di questi piccoli alvei non pare però risentire dei medesimi condizionamenti strutturali. Nel bolognese, infatti, i corsi d'acqua che trovano origine nell'elemento idrografico pedecollinare, hanno decorso condizionato più dai corpi alluvionali depositati dai fiumi maggiori (Reno e Idice-Savena).

La figura 3.7 offre una rappresentazione di sintesi del contesto deposizionale più recente della pianura bolognese. Alla fine degli anni settanta, gli studi pedologici dell'allora "Servizio Cartografico" regionale hanno infatti permesso di avviare un'accurata ricostruzione degli ambienti deposizionali recenti anche attraverso l'interpretazione di foto aeree. Ciò ha permesso di giungere a una completa ricostruzione della morfologia del sottosuolo dell'intera pianura regionale, tuttora in continuo aggiornamento e tuttavia ancora basata sui contenuti del primo impianto (D. Preti, 1987). Le successive edizioni della carta morfologica, sempre aggiornate e corrette, hanno anche compreso datazioni storiche di probabile formazione dei corpi geologici più recenti.

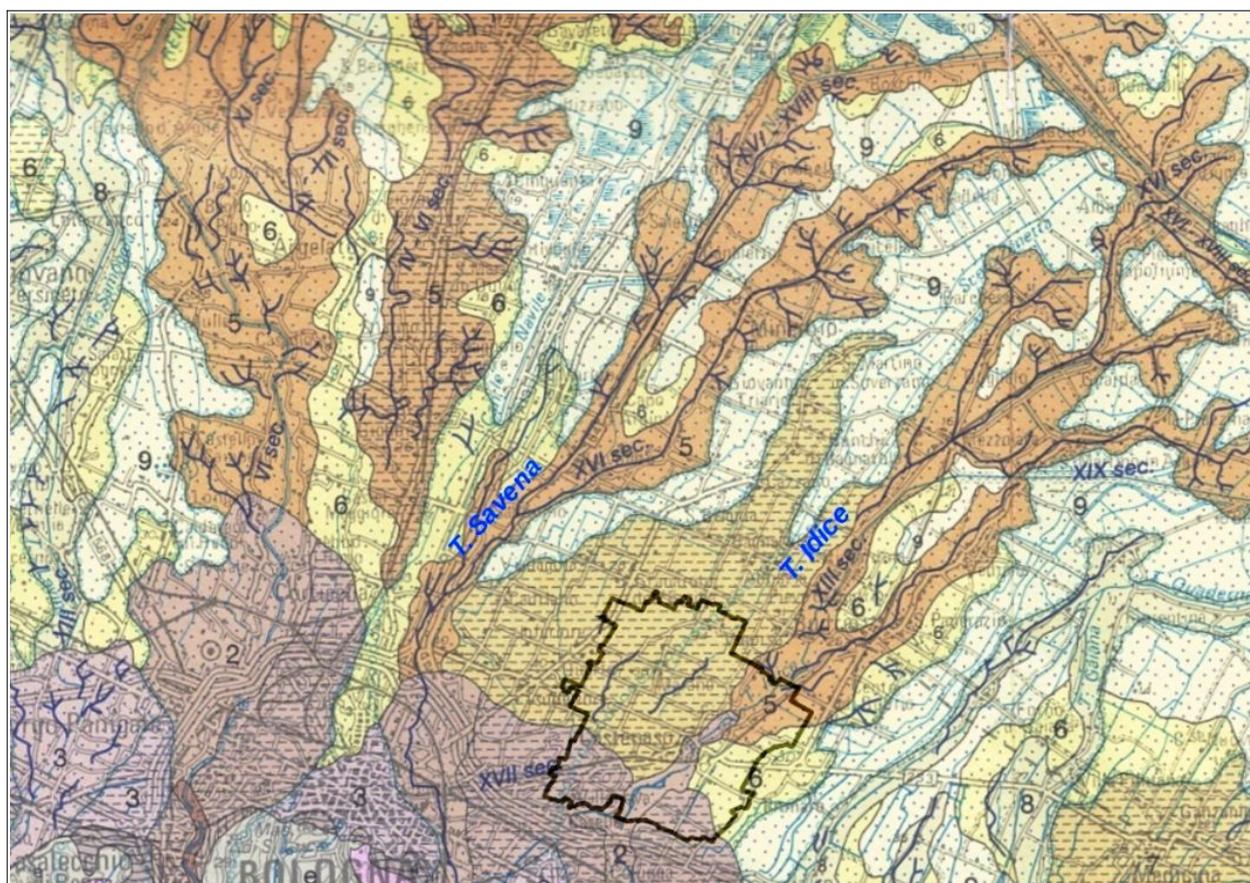


Figura 3.6 – Stralcio della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna scala 1:250.000 (a cura di D. Preti, RER, 1999). I depositi di piana alluvionale sono numerati progressivamente (es: n.5 "canale e argine prossimale"; n.6 "argine distale"; n.7 e n.8 "argine e canale indifferenziati; n.9 "depositi interfluviali e depositi di palude"). Sono riportate le principali tracce dei paleoalvei con datazione storica

È necessario rammentare come tra Bologna e il Comune di San Lazzaro di Savena, l'alveo del Savena non è naturale ma è stato creato nel XVIII secolo, facendolo confluire nell'Idice per proteggere il Capoluogo di Provincia dalle periodiche inondazioni. In precedenza, il corso d'acqua naturale del Savena giungeva fino alle mura cittadine bolognesi poi si dirigeva verso nord passando in corrispondenza dell'area fieristica. L'antico alveo è tuttora esistente, canalizzato nel XVI secolo con il nome di "Savena abbandonato" e percorre verso nord la pianura bolognese parallelamente al Navile e al Reno. Il tratto rettilineo del "Savena abbandonato" si dirige da Capo d'Argine (insediata sui depositi antropici di argine) e prosegue verso Altedo e alle Valli di Malalbergo, dove sfocia nel Reno.

La figura 3.6 evidenzia come il territorio più orientale di Castenaso sia stato condizionato dalle tracimazioni più recenti del torrente Idice, mentre nel settore centro occidentale l'origine dei depositi sub affioranti risulta di attribuzione più incerta, presumibilmente riconducibile a tracimazioni recenti di corsi d'acqua anche secondari.

3.3 Idrogeologia

La conoscenza dei dati idrogeologici, come ad esempio il campo di moto della falda, la tipologia (se libera oppure se confinata) fornisce utili indicazioni anche per le analisi di pericolosità sismica. Per la pianura, a titolo d'esempio, i dati di idrogeologia devono essere considerati per le valutazioni relative alla suscettibilità dei sedimenti alla liquefazione e possono essere considerati anche per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

Per il territorio comunale, un utile documento conoscitivo è rappresentato dalla Carta Idrogeologica alla scala 1:25:000 (tavola Ca.B.1.2) elaborata per il Quadro Conoscitivo del PSC in forma associata "Valle Idice", all'epoca comprendente il Comune di Castenaso.

Lo studio idrogeologico del PSC si è basato sul monitoraggio delle quote d'acqua in pozzi freatici del territorio studiato, effettuato nel 2007. I dati raccolti hanno consentito la ricostruzione del tetto dell'insieme della falda meno profonda del territorio studiato, individuando soggiacenze, direzioni di deflusso, spartiacque sepolti ecc.

La figura 3.7 propone uno stralcio della citata cartografia idrogeologica del territorio comunale. In sintesi, si evince un generale deflusso sotterraneo verso N-NE e con soggiacenze della falda generalmente inferiori a 3 metri. Si riscontra, tuttavia, il significativo condizionamento piezometrico indotto dall'attuale alveo inforrato dell'Idice, che costituisce ormai un definitivo asse drenante della falda meno profonda. La figura 3.8 rappresenta un'ulteriore delimitazione del territorio comunale caratterizzato da soggiacenze della falda superiori a 5 metri, ricostruita sulla base del dato piezometrico ricavato dalle indagini penetrometriche.

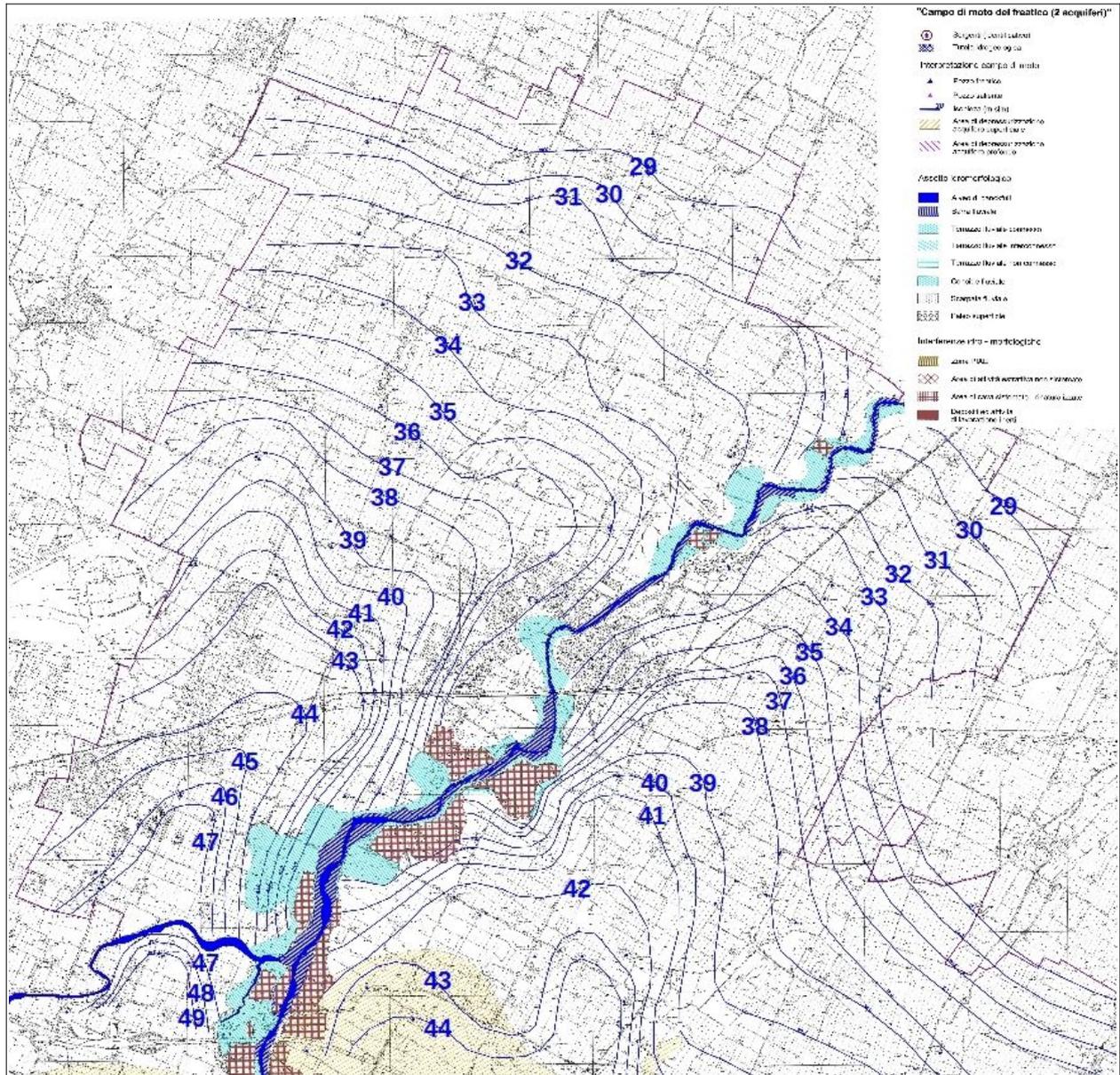


Figura 3.7 – Stralcio della Carta Idrogeologica - Tav Ca.B.1.2 - alla scala 1:25.000 prodotta per le analisi conoscitive del PSC associato Valle Idice (2008)

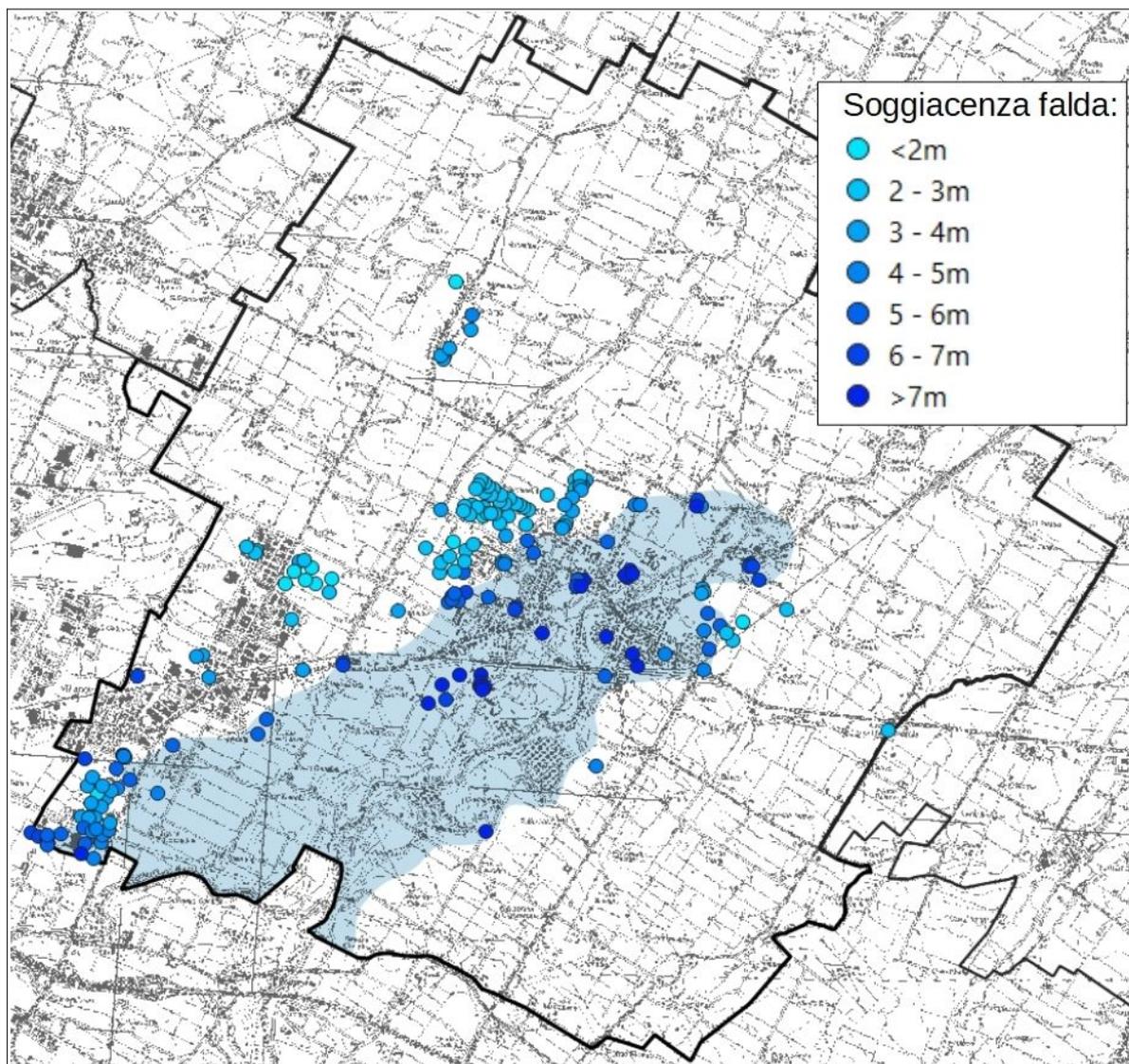


Figura 3.8 - Delimitazione del territorio di Castenaso con soggiacenze della falda maggiori di 5 metri

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Indagini pregresse

La fase iniziale di lavoro ha previsto la raccolta, la selezione e il riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di studiato. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove e in particolare:

- ✓ la banca dati geognostica fornita dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna;
- ✓ le indagini raccolte presso l'Ufficio Tecnico comunale di Castenaso (indagini eseguite per il PSC e per le proposte di inserimento nel POC; relazioni geologiche redatte per progetti di costruzione e/o Piani Attuativi).

Le prove pregresse, implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, sono state così distinte per tipologia:

- ✓ n. 31 sondaggi a carotaggio continuo (S);
- ✓ n. 152 pozzi per acqua (PA);
- ✓ n. 1 trincea;
- ✓ n. 179 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- ✓ n. 55 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTE);
- ✓ n. 49 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- ✓ n. 15 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 6 stendimenti sismici passivi Re.Mi.
- ✓ n. 2 tomografie elettriche (ERT)
- ✓ n. 59 registrazioni microtremori a stazione singola (HVSr).

Si evince il buon numero e densità di prove per le aree urbane del Comune, tuttavia nel corso dello studio di MS è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile, lo studio di MS ha dunque espletato una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Le figure 4.1 e 4.2 riportano la distribuzione delle prove di repertorio nell'intero territorio comunale e delle ulteriori indagini integrative eseguite, come vedremo, per questo studio.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato *.pdf nella cartella Indagini\documenti contenuti nell'archiviazione dei dati prodotta per questo studio.

4.2 Le nuove indagini eseguite

Per l'elaborazione della MS di “livello 2”, con locali approfondimenti di “livello 3”, si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Il “piano delle indagini” (tipologia; quantità; localizzazione) è stato definito allo scopo di perseguire i seguenti obiettivi:

- fornire la caratterizzazione sismostratigrafica più raffinata del sottosuolo negli insediamenti urbani più “vulnerabili” (es. Capoluogo e frazioni/località Fiesso, Fossamarcia, Marano e Villanova) già preliminarmente inclusi in zone di attenzione per effetti locali (es. potenzialmente liquefacibili) in base agli studi di pericolosità sismica pregressi;
- proporre una “base dati” (geognostica e geofisica) di riferimento per gli approfondimenti sismici nelle zone caratterizzate da potenziale instabilità (es. zone di attenzione per liquefacibilità).

Per espletare gli approfondimenti di “livello 2” si è dunque deciso di effettuare un buon numero di penetrometrie CPTU e di eseguire ulteriori indagini geofisiche (ESAC-SPAC; MASW; HVSR). Nel territorio comunale di Castenaso sono state complessivamente eseguite le seguenti indagini integrative:

- ✓ *n. 7 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su cingolato semovente “Pagani”, dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le prove sono state spinte alla profondità massima di 20 metri e permettono di definire le caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile anche ai fini delle valutazioni sulla propensione alla liquefacibilità dei sedimenti in caso di sisma.



Foto 4.1 - Prove CPTU eseguite a Villanova (P37496) e nel Capoluogo (P37500)

Si rammenta come le prove penetrometriche elettriche consentano una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).

- ✓ *n. 2 stendimenti sismici in array bidimensionale ESAC* (foto 4.2)→ Per questo studio, sono stati elaborati due modelli sismostratigrafici profondi mediante tecniche di investigazione sismiche basate sulla raccolta ed analisi del rumore sismico ambientale, utilizzando il metodo ESAC (Autocorrelazione Spaziale Migliorato).

L'utilizzo delle tecniche passive sull'analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione V_s può essere ricavata indirettamente dall'analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere i profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio "S" anche molto profonde, favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D, impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz). Gli stendimenti sono stati rispettivamente eseguiti nel Capoluogo e presso la frazione Villanova e hanno previsto geometrie "a elle" con spaziatura tra i geofoni di 5 metri (lunghezza complessiva degli stendimenti 115 metri).



Foto 4.2 - Prova ESAC_SPAC eseguita nel Capoluogo (P37502) e registrazione HVSR (P37504) eseguita presso la sede Hera

- ✓ *n. 4 stendimenti in array lineare MASW/RE.MI* → eseguiti nel Capoluogo (due prove), a Marano e presso la sede Hera). Le quattro prove MASW/ReMi hanno permesso di stimare la velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s) nel sottosuolo fino a circa -

30÷35 metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, passivi e attivi (generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni).

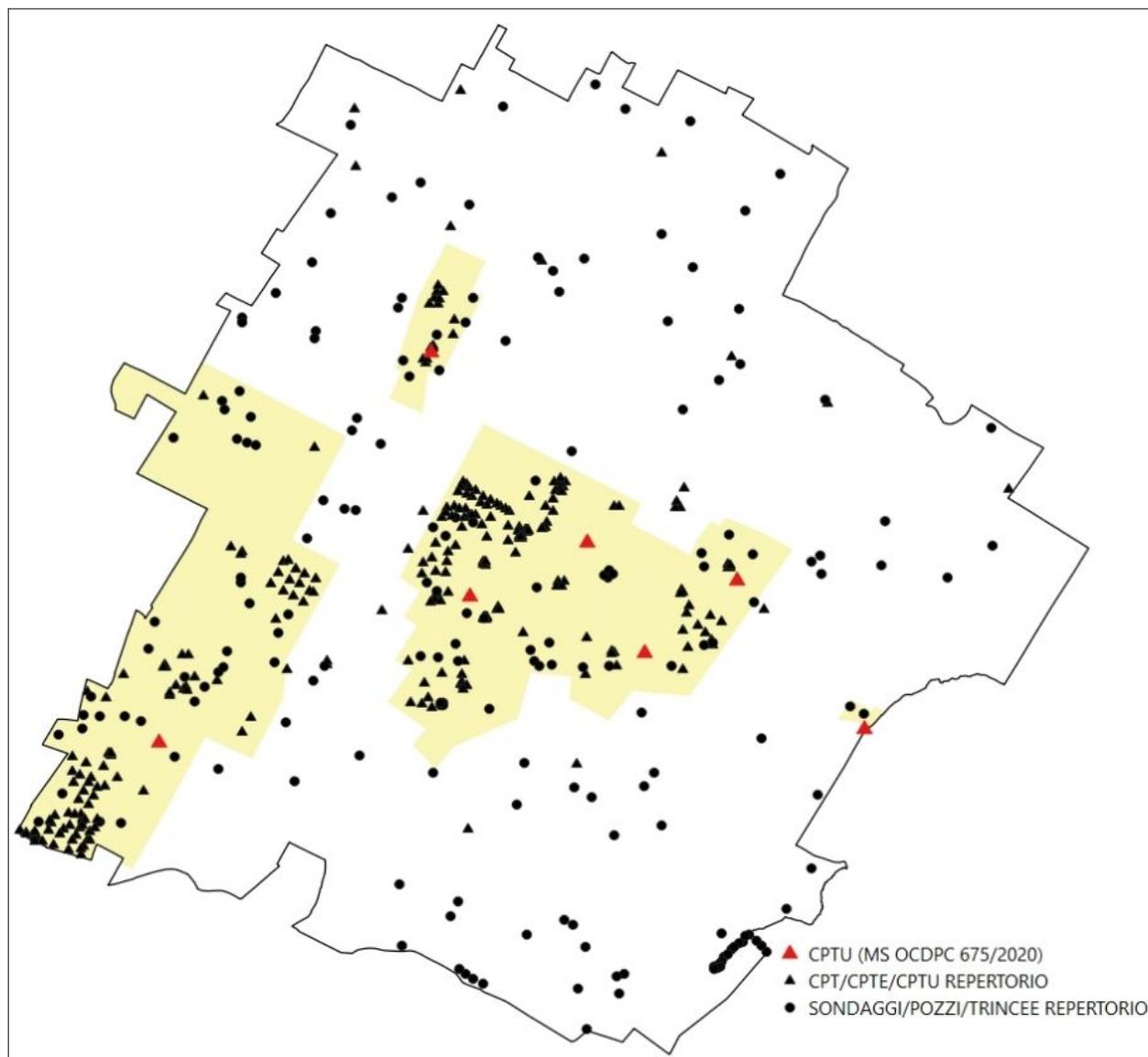


Figura 4.1- Localizzazione delle indagini geognostiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove integrative eseguite per questo studio

- ✓ n. 8 registrazioni del microtremore sismico a stazione singola con tecnica HVSR → Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale “Tromino” (foto 4.2) e sono finalizzate all’elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarelli e Castellaro, 2011). 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 la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ($10-15 \text{ m/s}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti.

Le figure 4.1 e 4.2 propongono una rappresentazione della distribuzione nel territorio studiato delle prove geonostiche e geofisiche disponibili.

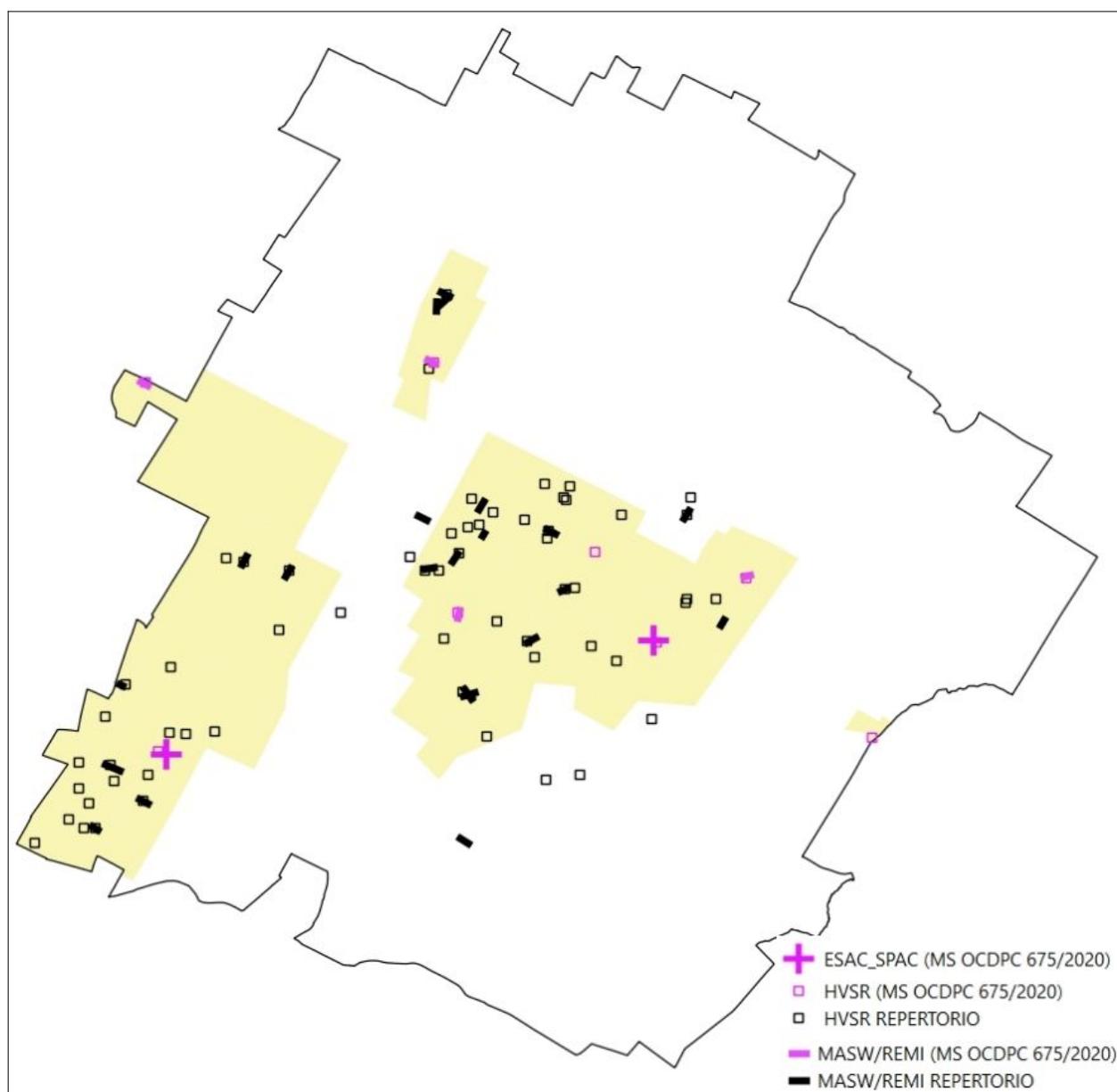


Figura 4.2 - Localizzazione delle indagini geofisiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove eseguite per questo studio

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 Castenaso si è potuto disporre di molti punti di controllo, seppure con evidenti concentrazioni in alcune aree, tutto sommato ben distribuiti sul territorio comunale urbanizzato. Questo contesto 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 (tavola 2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5÷6 metri) e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4), che presenta la suddivisione del territorio comunale sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

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

5.1 Sottosuolo profondo

Una ricostruzione del modello geologico profondo del territorio studiato è possibile attraverso l'analisi e delle sezioni geologiche già disponibili e riportate nelle cartografie di microzonazione sismica.

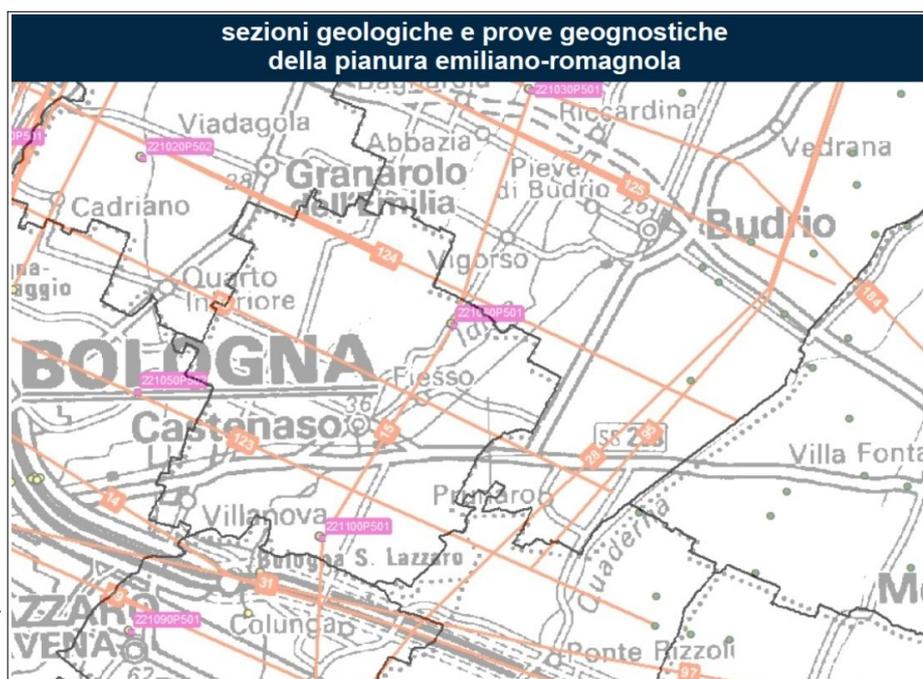


Figura 5.1 - Tracce delle sezioni geologiche pubblicate nel sito del SGSS della RER

Per il territorio di Castenaso sono già disponibili varie sezioni geologiche profonde e in particolare per questo studio sono state considerate le sezioni n. 15, 123 e 124 elaborate dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna nell'ambito degli studi del progetto CARG⁴ (figure 5.1 e 5.2).

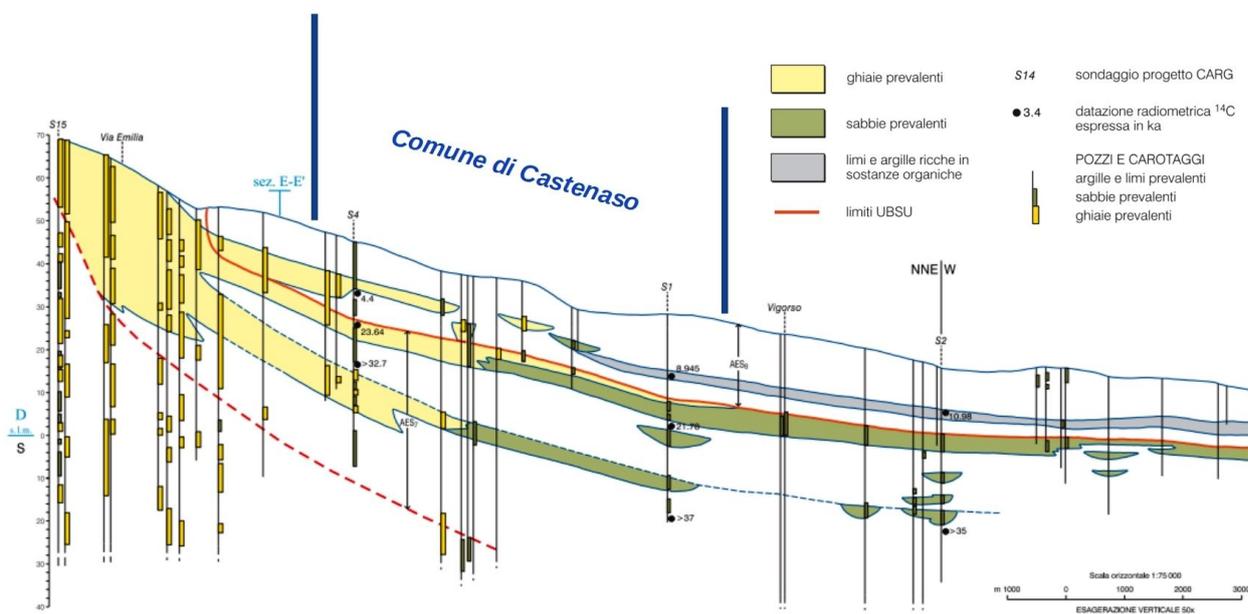


Figura 5.2 – Stralcio della sezione RER n. 15

Come vedremo, le sezioni profonde RER sono risultate particolarmente utili, sia per la sua collocazione (attraversano i settori il territorio urbanizzato), sia per le informazioni di sottosuolo, derivate dalle numerose terebrazioni profonde, realizzate anche nel territorio Comunale.

Un ulteriore e importante contributo per la modellazione geologico-sismica profonda è derivato dagli studi del SGSS, sintetizzati nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000). Uno stralcio di tale cartografia, riprodotto in figura 5.3, evidenzia la profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore SERS nel territorio di studio.

Come già descritto nel capitolo 3, il territorio di Castenaso ricade al margine sud della blanda sinclinale compresa tra le “Pieghie Pedepenniniche” e il settore orientale dalla “Dorsale Ferrarese Interna”. Nell'area studiata, la base del Sintema SERS viene stimata a quote che risultano in approfondimento verso nord (da circa -110 m a circa -210 metri, rispetto al piano campagna).

Per il territorio di Castenaso, i dati di sottosuolo disponibili evidenziano successioni alluvionali caratterizzate da alternanze di sedimenti più fini (limi e argille) e depositi più grossolani (ghiaie e sabbie). Più in particolare gli spessori ghiaiosi tendono a passare gradualmente a tessiture più sabbiose verso nord.

⁴ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/sezioni-geologiche-prove-geognostiche-pianura>

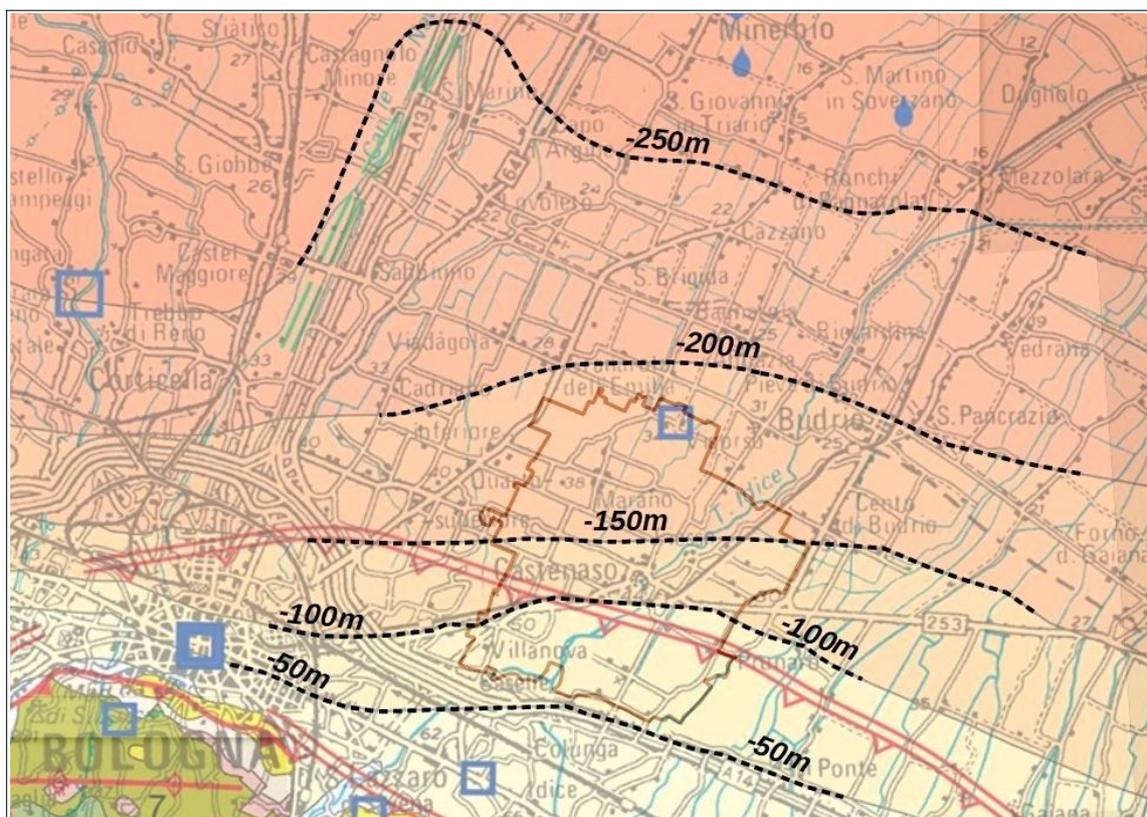


Figura 5.3– Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Castenaso e rimarcate le isobate della base del Sintema SERS (metri s.l.m)

In questo senso, la figura 5.4 riporta uno schema di sintesi del tetto degli intervalli ghiaiosi meno profondi, derivato dai dati del SGSS (tetto ghiaie AES8/AES7) e dalle ulteriori informazioni stratigrafiche recuperati per questo studio. Dalla figura 5.4 si evince come nel territorio più meridionale (vedi Capoluogo e frazione Villanova) sia frequentemente possibile intercettare spessori ghiaiosi discontinui anche a modeste profondità (da circa 10 metri) mentre nel territorio settentrionale si possono ancora intercettare ghiaie sabbiose a profondità superiori a 20 metri. Si tratta, generalmente, di ghiaie scarsamente addensate e di modesto spessore (fino a 1–3 metri) e soltanto in parte attribuibili con sicurezza alla deposizione del torrente Idice. Verso nord, come già descritto, le ghiaie tendono gradualmente a passare a granulometrie più sabbiose.

Le terebrazioni disponibili hanno inoltre consentito di elaborare per questo studio due nuove sezioni geologico–tecniche (figura 5.5), più dettagliate per quanto riguarda la modellazione litotecnica del sottosuolo fino a circa 20÷30 metri di profondità. Le sezioni sono state elaborate per meglio caratterizzare il sottosuolo nei principali settori urbanizzati del Capoluogo (sezione 1–1’) e della frazione Villanova (sezione 2–2’) e vengono rappresentate nelle successive figure 5.6 e 5.7.

Figura 5.4- Schema di sintesi del tetto degli intervalli ghiaiosi meno profondi (dati derivati dal SGSS e dalle ulteriori informazioni stratigrafiche raccolte con questo studio.

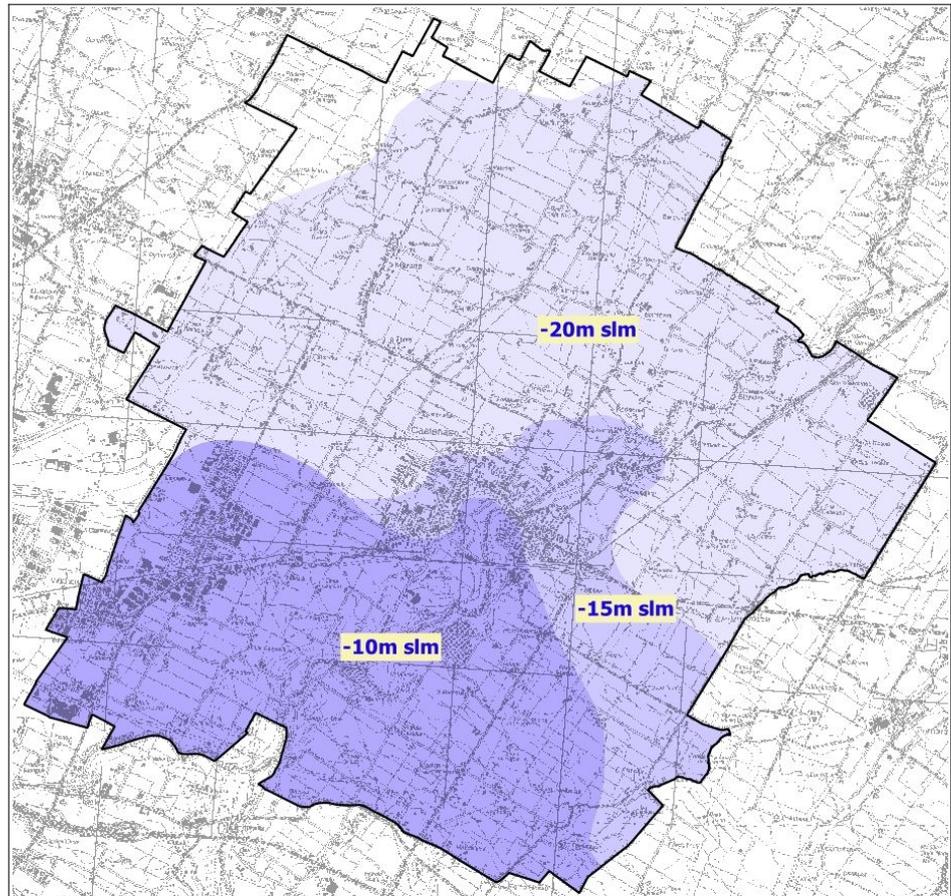
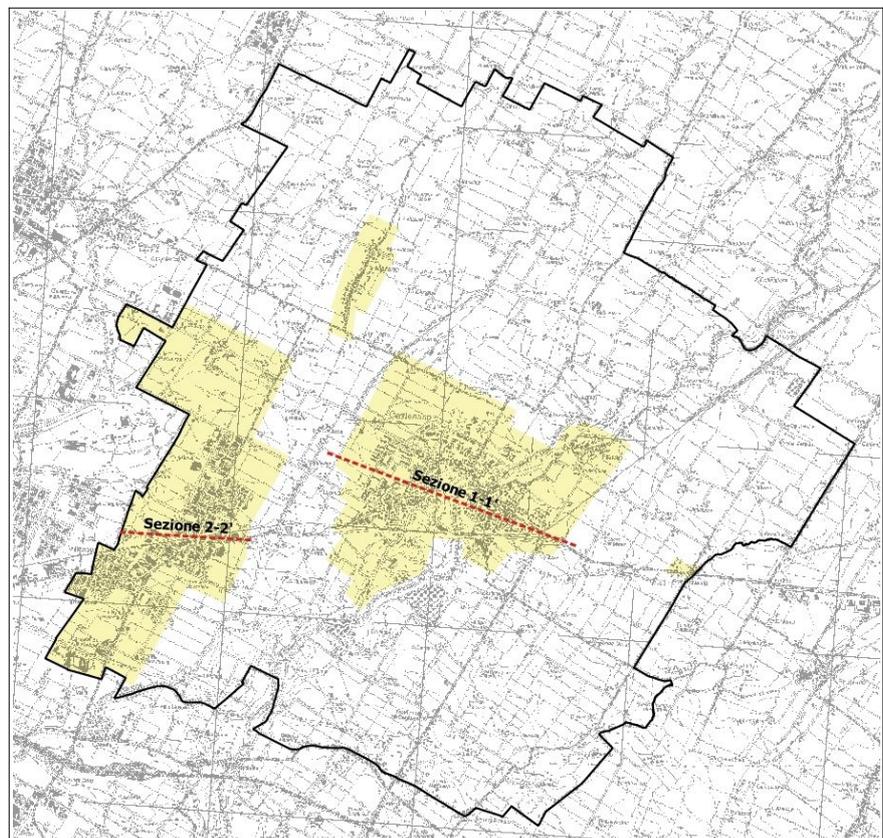


Figura 5.5 - Tracce delle sezioni geologico-tecniche realizzate per questo studio (sezioni 1-1' e 2-2')



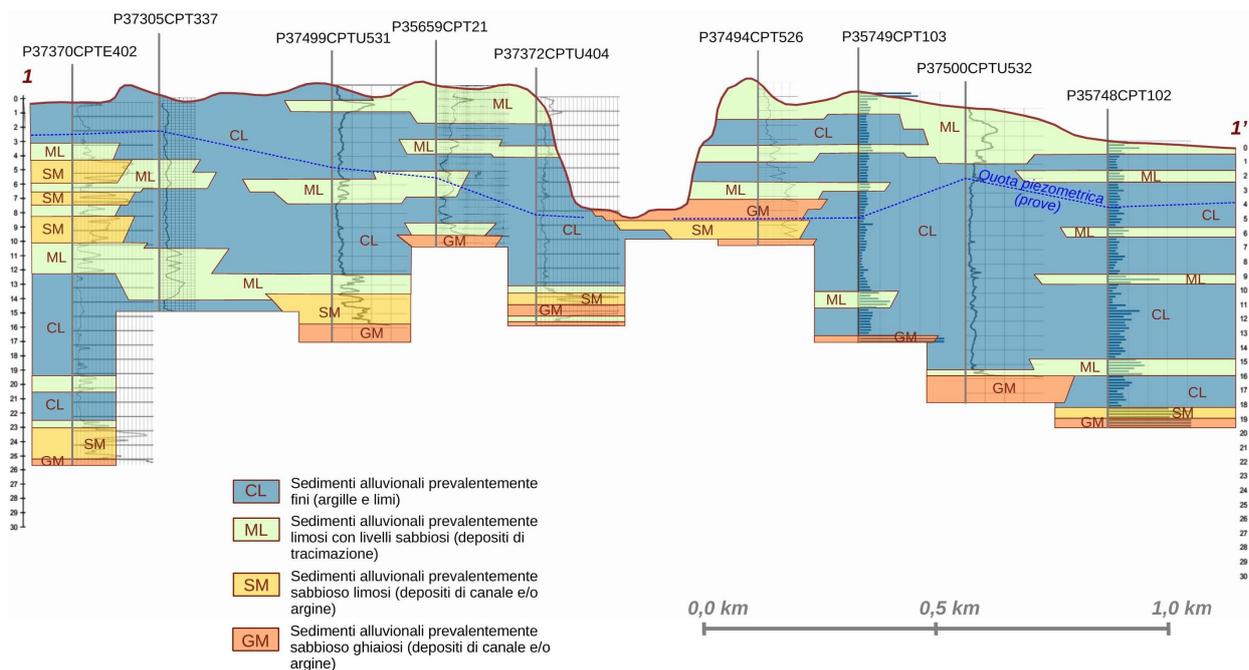


Figura 5.6 - Stralcio della sezione geologico-technica 1-1' realizzata per lo studio di MS (Capoluogo)

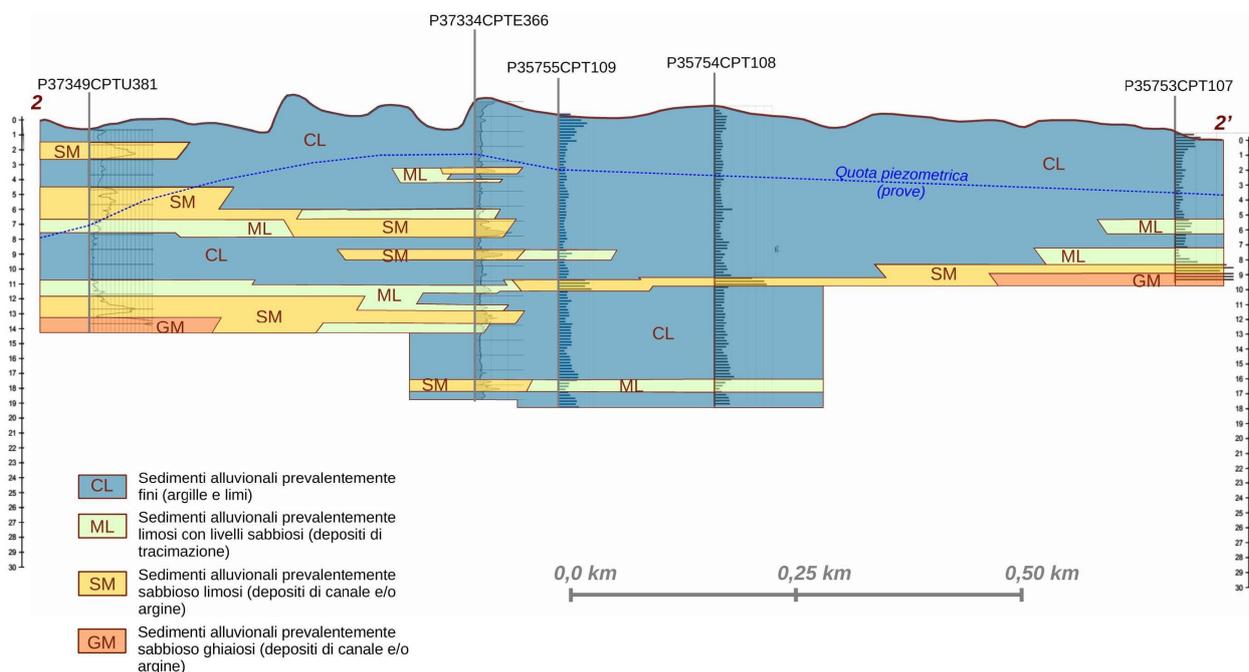


Figura 5.7 - Stralcio della sezione geologico-technica 2-2' realizzata per lo studio di MS (frazione Villanova)

Le due sezioni evidenziano, per i territori urbanizzati, la presenza di alternanze di intervalli più granulari (sabbie ghiaiose, sabbie e sabbie limose) e sedimenti più fini (argille e limi). Anche gli strati sabbiosi risultano di spessore contenuto (prevalentemente 1-2 metri) e discontinui. Le sezioni riportano anche il livello piezometrico ricavato dalle prove: in particolare la sezione 1-1' evidenzia il basso piezometrico derivato dal drenaggio dell'alveo infornato dell'Idice.

Le indagini e analisi effettuate per lo studio di MS comunale hanno infine consentito un ulteriore approfondimento sulla caratterizzazione sismostratigrafica del sottosuolo. In particolare, i due stendimenti ESAC-SPAC (eseguiti nel Capoluogo e presso la frazione Villanova) e i quattro ulteriori stendimenti MASW/ReMi consentono di stimare velocità di taglio equivalenti delle onde sismiche (V_{s30}) comprese tra 227 m/s e 257 m/s. La figura 5.8 rappresenta il confronto dei modelli sismostratigrafici derivati dalle prove ESAC-SPAC: questi due stendimenti indicano incrementi delle velocità di taglio fino a 400÷450 m/s a circa 130 metri di profondità.

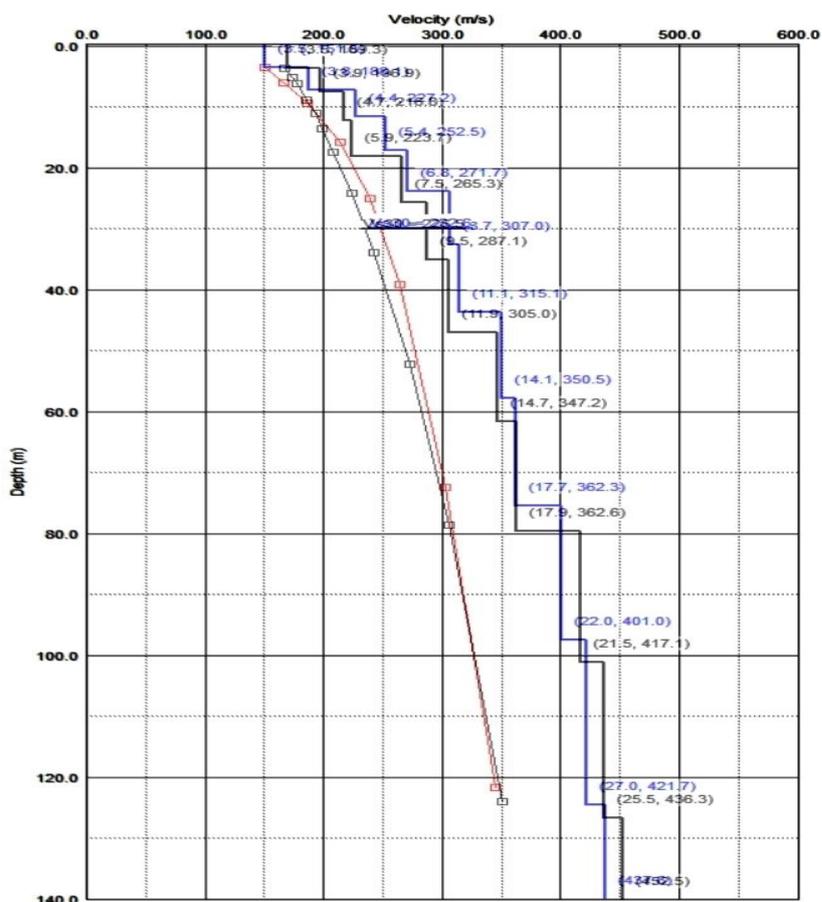


Figura 5.8 - Confronto dei risultati di V_s ricavati dagli stendimenti sismici ESAC-SPAC realizzati per questo studio

Gli esiti delle nuove indagini geofisiche sono da ritenersi complessivamente coerenti con le informazioni già disponibili e derivate dalle altre prove geofisiche. Le prove di repertorio evidenziano, tuttavia, un maggior range di valori (da 180 m/s a 293 m/s) in parte riferibile ai limiti di accuratezza delle prove e in parte all'effettiva eterogeneità del sottosuolo investigato. In questo senso, risultati moderatamente più elevati di V_{s30} si riscontrano nel settore centrale e nel settore SE del Capoluogo, per la presenza di intervalli ghiaiosi più diffusi e spessi. Presso Villanova, invece, i dati geofisici indicano V_s equivalenti blandamente minori a dimostrare la presenza di strati ghiaiosi e sabbioso ghiaiosi meno rigidi. La figura 5.9 localizza i punti di controllo delle V_s e i relativi risultati.

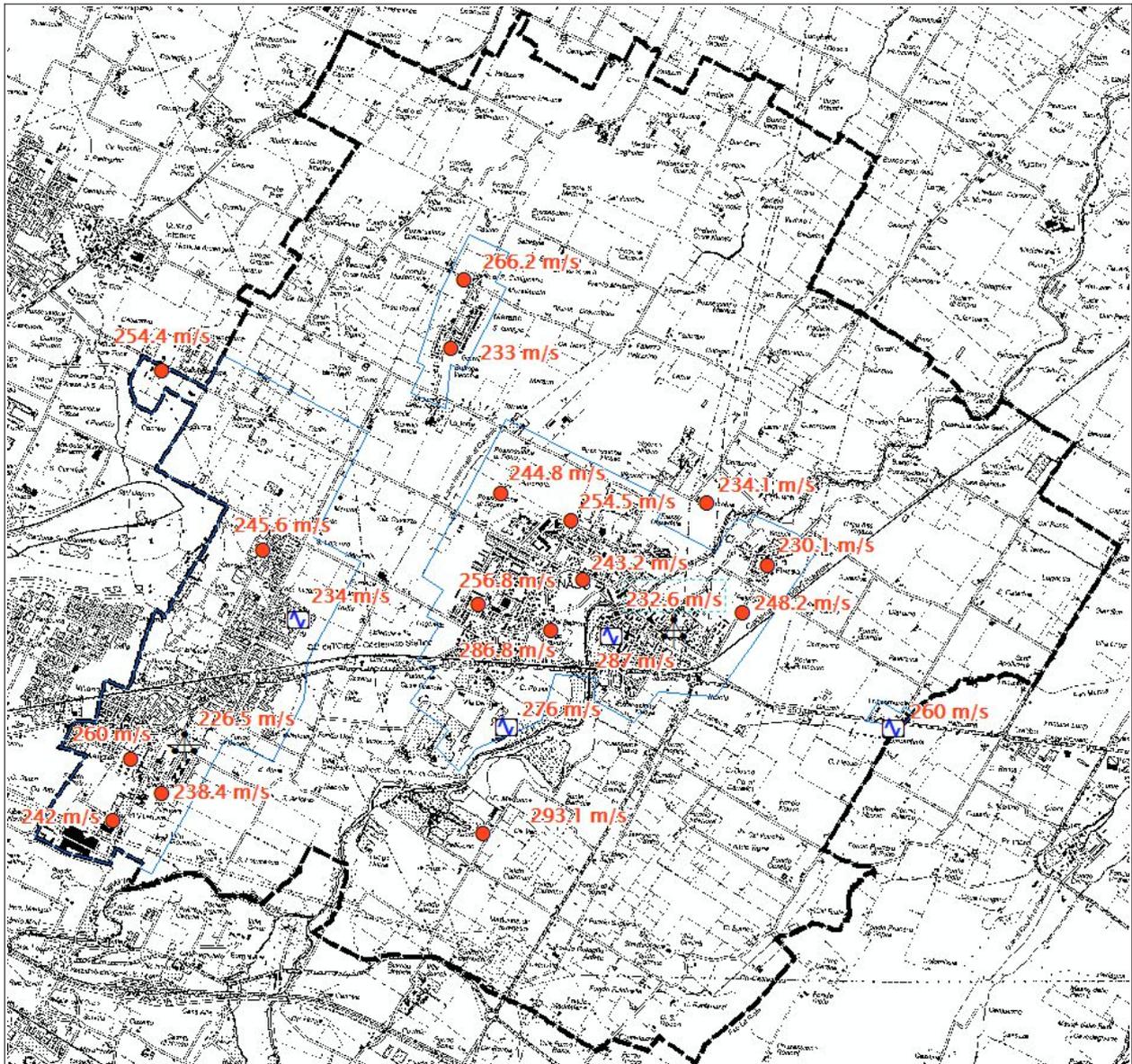


Figura 5.9 – Indagini geofisiche con relativa stima delle velocità delle onde sismiche di taglio (V_s)

Nel territorio comunale sono state inoltre raccolte/realizzate registrazioni dei microtremori sismici con tecnica HVSR. Le registrazioni sismiche HVSR, sfruttando la teoria ormai consolidata dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quello verticale, consentono la stima delle più significative frequenze di amplificazione del sottosuolo.

Salvo alcune prove, presumibilmente inficiate da errori di acquisizione e/o particolari condizioni locali (vedi la prova HVSR eseguita nelle ex cave a sud del Capoluogo), gli esiti registrazioni tromografiche dimostrano una discreta omogeneità della risposta sismica locale, con basse frequenze fondamentali F_0 ($<1,0\text{Hz}$) in tutto il territorio comunale studiato e con forme spettrali relativamente simili tra loro e di intensità da basse a moderate (figura 5.10).

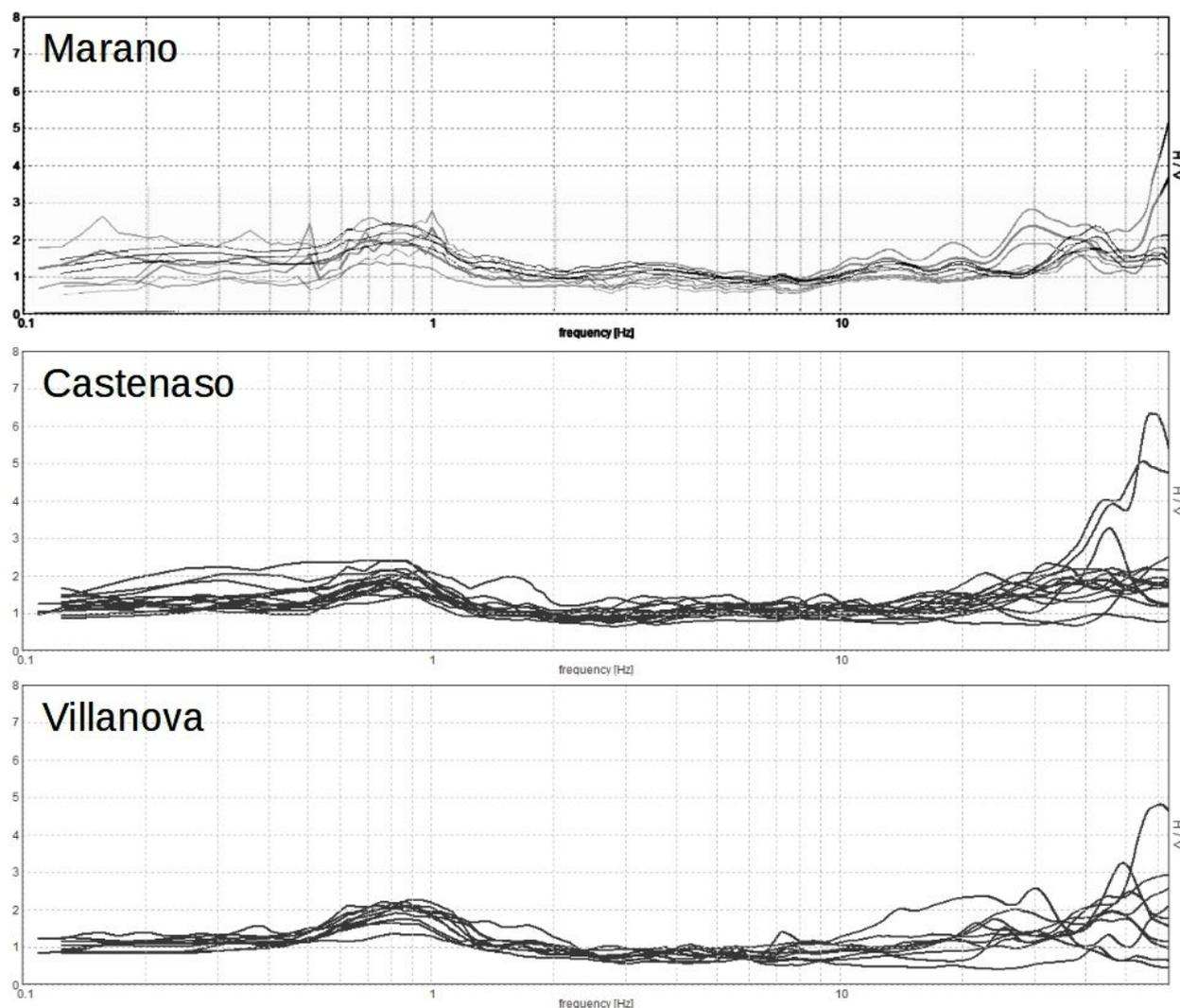


Figura 5.10 - Confronto tra spettri H/V ricavati da registrazioni tomografiche effettuate presso i principali areali urbanizzati

La figura 5.11 offre una rappresentazione sintetica dei risultati HVSR in termini di frequenza fondamentale (f_0). Nella figura, vengono riportate anche le registrazioni HVSR raccolte/realizzate dallo Scrittore⁵ nei Comuni limitrofi a Castenaso. La rappresentazione evidenzia come il territorio di Castenaso risulti inquadrato in un contesto di RSL caratterizzato da riflettori sismici profondi (presumibilmente >100 metri) rispetto ai Comuni più meridionali (es. San Lazzaro di Savena) che, invece, presentano frequenze fondamentali più elevate per la presenza di riflettori sismici più superficiali (ghiaie più spesse e rigide degli apparati di conoide dei torrenti Savena e Idice).

⁵ Studi di MS redatti per i Comuni di Bologna, Granarolo, Minerbio, San Lazzaro di Savena, Ozzano

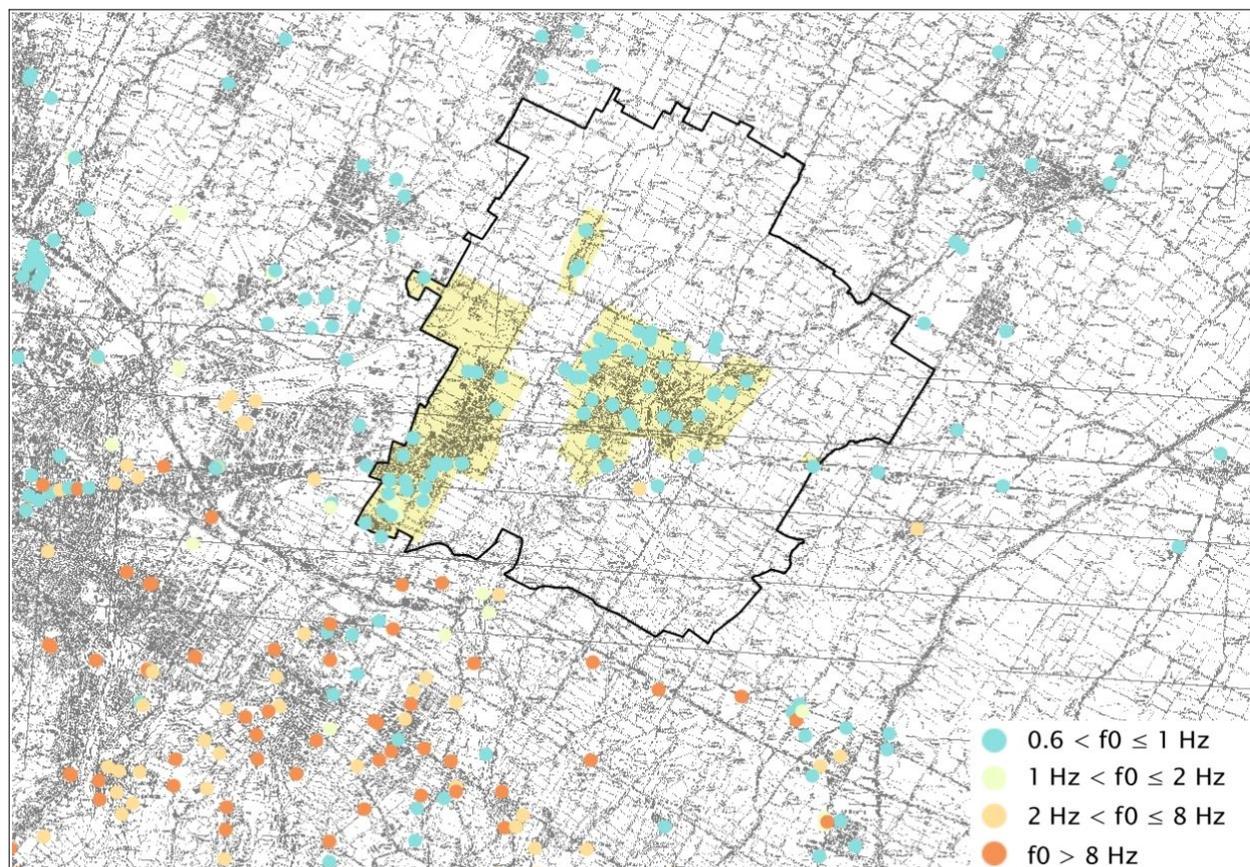


Figura 5.11 – Rappresentazione sintetica dei risultati HVSR in termini di frequenza fondamentale (f_0). I risultati di f_0 sono raccolti nelle classi di frequenza indicate nella DGR 476/2021

5.2 Litologie sub-affioranti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle numerose prove geognostiche disponibili. Le stratigrafie derivate dai sondaggi consentono un controllo diretto delle tessiture, tuttavia si sono considerati anche gli esiti tessiturali ricavati dalle prove penetrometriche e in particolare dalle prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili) e dalle prove CPTU eseguite per questo lavoro. Da queste prove CPTU è possibile ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

Tutte queste informazioni, hanno permesso la classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2) e sulla prevalenza tessutturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a circa 5÷6 metri dal piano campagna, con esiti rappresentati nella “Carta Geologico-Tecnica (tavola 2). La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo” caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio.

Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli

spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

Le terebrazioni disponibili evidenziano come gran parte del territorio comunale sia caratterizzato da sedimenti più superficiali attribuibili a tracimazione fluviale limoso sabbiosa, ad esclusione del settore comunale sud orientale prevalentemente caratterizzato da limi e argille di piana inondabile. L'attuale alveo (inforrato) dell'Idice e i suoi depositi terrazzati contigui sono invece caratterizzati da alluvioni sub affioranti prevalentemente sabbioso ghiaiose.

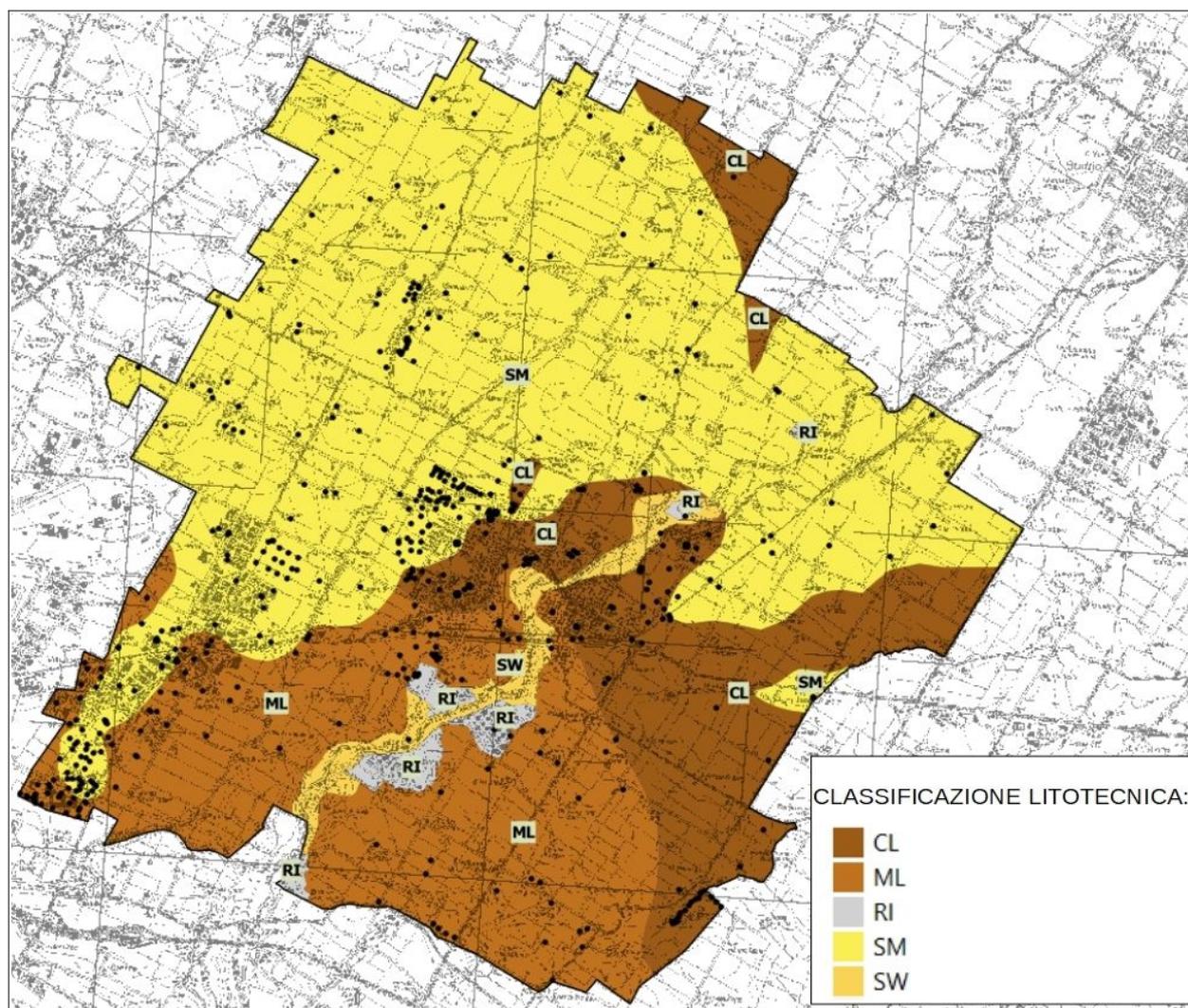


Figura 5.12 - Schema litotecnico del sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Castenaso. Sono rappresentate anche le prove geognostiche disponibili

In conclusione, i dati disponibili indicano come i sedimenti superficiali siano riconducibili a differenti classi geotecniche USCS/AGI in relazione al diverso contesto deposizionale recente degli areali di studio. In questo senso, la figura 5.12 rappresenta una sintesi del contesto litotecnico superficiale, ove il territorio comunale risulta classificato "SW" per la presenza di

ghiaie e sabbie ghiaiose (alveo e terrazzamenti contigui), da “SM” a “ML” per la presenza di tracimazioni recenti limoso sabbiose e/o canali sepolti sabbioso limosi in grado di condizionare il contesto locale di pericolosità sismica (costituiscono “zone di attenzione” per liquefazione). I depositi meno profondi del territorio comunale sud orientale sono invece classificabili “CL” per la prevalente presenza di limi e limi argillosi più o meno consistenti di piana inondabile.

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

6.1 Commenti introduttivi

I dati geognostici considerati offrono una sufficiente “copertura” conoscitiva delle aree studiate e le indagini geognostiche e geofisiche realizzate per questo studio di microzonazione, consentono una modellazione del sottosuolo esaustiva per individuare le “zone di attenzione” localizzabili nel territorio studiato e per consentire la quantificazione 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 definito le aree nelle quali si 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 evidenziare anche le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili con questo livello di approfondimento.

6.2 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 la quantificazione della Risposta sismica Locale.

Occorre in questo senso evidenziare come 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), nonché gli studi di microzonazione sismica ormai svolti anche per gli altri Comuni limitrofi, abbiano offerto un importante contributo conoscitivo per quanto riguarda la risposta sismica nella pianura padana.

Gli studi regionali, confermati anche da ulteriori indagini effettuate nei Comuni della Pianura, hanno infatti 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. 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.

Per quanto riguarda il territorio comunale di Castenaso, le informazioni di sottosuolo più profonde disponibili (vedi sezioni geologiche; sondaggi e dati ricavati da ESAC-SPAC) sono stati confrontati con gli esiti delle registrazioni HVSR, per interpretare modelli sismostratigrafici il più possibile rappresentativi del contesto locale.

Come già scritto (cfr. paragrafo 5.1), le registrazioni HVSR evidenziano amplificazioni spettrali H/V relativamente omogenee tutto il territorio comunale, con massimi spettrali H/V a frequenze prevalentemente comprese tra 0,8 Hz e 1,0 Hz e correlabili a riflettori sismici situati a profondità >100 metri. Anche gli stendimenti ESAC-SPAC non riscontrano differenze significative nei rispettivi modelli sismostratigrafici, con Vs che raggiungono i 400÷450 m/s a circa 130 metri di profondità.

Le massime amplificazioni spettrali H/V sono presumibilmente correlabili a differenti riflettori sismici, tuttavia collocabili in un range di profondità forse limitato. In questo senso, nel settore comunale più meridionale, il principale riflettore sismico potrebbe collocarsi al tetto del sistema alluvionale SERI, mentre verso nord il principale riflettore così individuato risulterebbe collocabile negli spessori di sedimenti più grossolani (ghieie e poi sabbie addendate) comprese tra il tetto delle unità AES6 e il tetto delle alluvioni SERI.

Si tratterebbero dei primi riflettori sismici in grado di contribuire significativamente alla risposta sismica locale al suolo, tuttavia i sedimenti sottostanti sono da considerarsi come un “pseudobedrock” sismico, in quanto ancora caratterizzati da Vs inferiori a 800 m/s, come emerge dalle studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni limitrofi.

6.3 Delimitazione delle zone di attenzione

I dati conoscitivi evidenziano come i principali effetti cosismici attesi siano sostanzialmente riconducibili ad amplificazioni dello scuotimento sismico in superficie e a fenomeni di liquefazioni e/o cedimenti post sisma dei sedimenti.

Come già descritto, per quanto riguarda l'amplificazione del moto sismico al suolo, i risultati delle indagini non evidenziano particolari situazioni di criticità, con amplificazioni relativamente omogenee nell'intero territorio. La propensione alla liquefazione dei sedimenti e la possibilità di cedimenti in caso di sisma dovrà invece essere opportunamente valutata sia alla scala territoriale, sia alla scala puntuale (es. per progettazione di interventi edificatori). L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, risulta infatti di fondamentale importanza per la 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 costruzioni⁶. 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 Castenaso ha permesso 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 230 punti di controllo (sondaggi a carotaggio continuo; prove penetrometriche CPT e CPTe/CPTU) utili a fornire dati tessiturali diretti/indiretti a profondità di almeno 10 metri. Tra queste prove, ben 110 sono penetrometrie statiche elettriche CPTe/CPTU. Si rammenta che le prove CPTe/CPTU consentono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili rispetto alle altre tipologie di penetrometrie statiche o dinamiche, in quanto restituiscono colonne litotecniche molto più definite (letture delle resistenze alla penetrazione fino a 1 cm/avanzamento).

Per delimitare le relative "zone di attenzione" introdotte nella cartografia MOPS, si è deciso di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e

⁶ Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

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 di manufatti (che risultano le più diffuse).

Nell’analisi della potenziale liquefacibilità dei sedimenti si è inoltre considerato il contesto idrogeologico locale, desunto dal quadro conoscitivo del PSC di Castenaso e dal controllo delle quote d’acqua misurate nelle prove geognostiche considerate (vedi paragrafo 3.3).

La tabella 6.1 riporta lo schema di classificazione delle indagini geognostiche sottoposte al controllo della potenziale liquefazione, mentre la figura 6.1 riporta alcune classificazioni esemplificative di prove penetrometriche controllate.

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

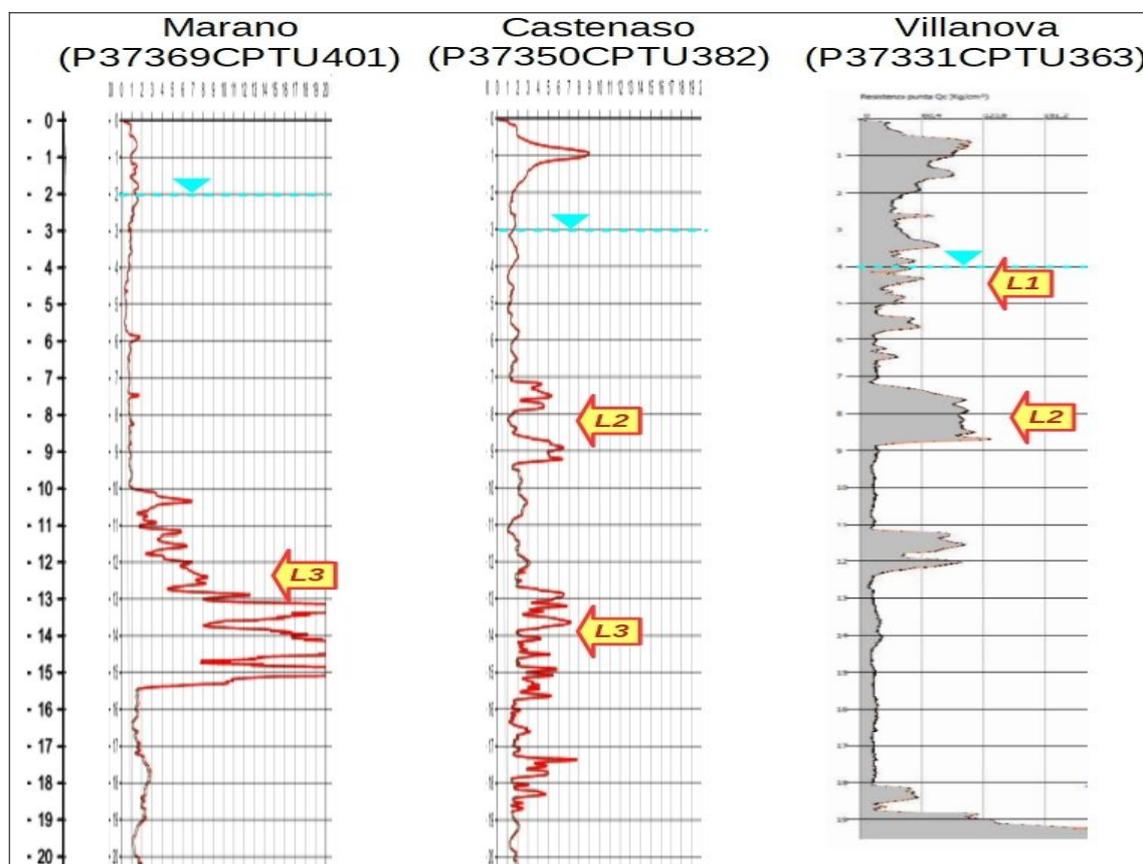


Figura 6.1 – Esempi di classificazione preliminare della propensione alla liquefacibilità desunta da prove CPTU/CPTU eseguite per lo studio di MS comunale

Le indagini hanno dunque permesso di delimitare quelle aree da ritenersi più critiche anche per gli edifici di costruzione ordinaria, cioè i settori di territorio caratterizzati dalla presenza di intervalli granulari potenzialmente liquefacibili di spessore anche significativo, ovvero >1 metro nei primi 10 metri di sottosuolo e >2 metri nel sottostante intervallo 10÷20 metri.

Il confronto tra esiti tessiturali, dati idrogeologici e dati morfologici locali ha quindi permesso una delimitazione (da ritenersi cautelativa) delle le “zone di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v. 4.2).

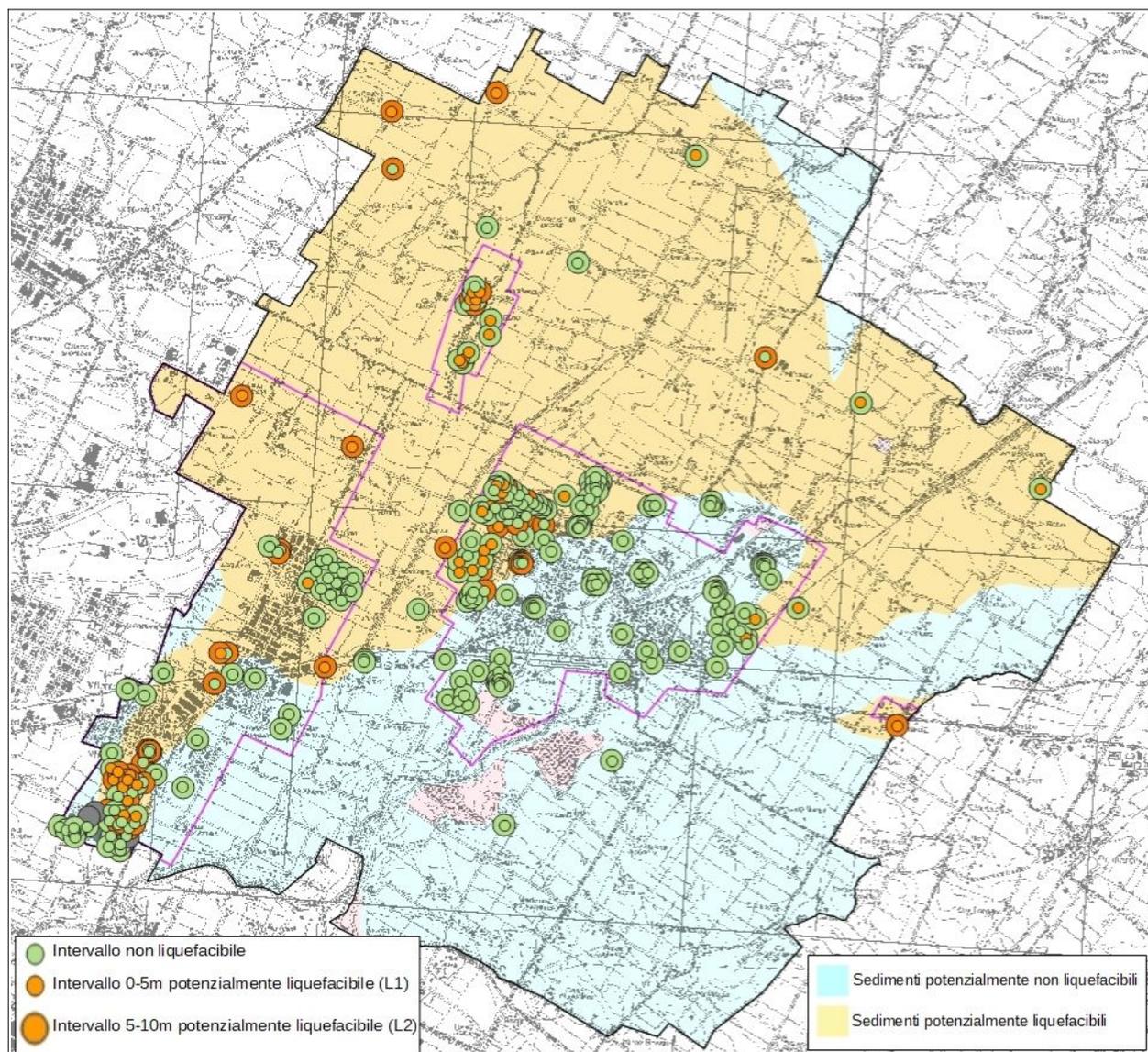


Figura 6.2 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda: punti classificati L1 e L2

In questo senso, la figura 6.2, rappresenta una sintesi della classificazione dei punti di controllo fino a 10 metri (sono rispettivamente classificati i punti “L1” e “L2”): tale profondità, infatti, risulta di maggiore importanza per le costruzioni in quanto generalmente comprende gran

parte del “volume significativo” dei manufatti. Occorre tuttavia segnalare come le indagini disponibili (in particolare nel settore comunale centro-settentrionale) abbiano anche intercettato spessori plurimetrici di sabbie più o meno limose, nei primi 15÷20 metri di profondità.

Come già descritto, le elevate soggiacenze locali negli areali limitrofi all'alveo inforato dell'Idice ha condizionato la classificazione, ad esempio escludendo da tale categoria strati comunque sabbiosi limosi ma risultati ormai definitivamente insaturi.

Nel capoluogo (settore occidentale) e nelle frazioni Marano e Villanova vengono dunque delimitate “zone di attenzione” per liquefazioni relativamente estese. Si tratta di areali da ritenersi tuttavia cautelativi in quanto si è tenuto conto della significativa variabilità stratigrafica evidenziata dalle indagini anche alla scala di dettaglio (es. indagini in singole lottizzazioni). Si sono frequentemente riscontrate, infatti, strutture sabbiose di argine/canale sepolti di modesta estensione laterale a dimostrare condizioni di tracimazioni e “crevasse” dell'Idice particolarmente localizzate e circoscritte, oppure tracimazioni che derivano da corsi d'acqua secondari di difficile ricostruzione.

Rispetto alle conoscenze pregresse, si segnala come i risultati della prova CPTU eseguita nella località Acquamarca abbia costretto a includere anche questo limitato areale di studio nelle “zone di attenzione” per liquefazioni. In tal senso, anche il controllo tessiturale delle indagini disponibili presso Villanova ha imposto un'estensione verso sud degli areali potenzialmente liquefacibili, come sinteticamente rappresentato anche nella sezione 2-2' (cfr. paragrafo 5.1) e in parte delimitati anche sulla base del contesto idrogeologico locale.

Infine, è necessario ricordare ulteriormente che, per le zone di potenziale propensione al fenomeno della liquefazione, si dovranno prevedere ulteriori approfondimenti per definire le effettive condizioni di pericolosità. Gli approfondimenti dovranno quantificare, con opportuni metodi di verifica (vedi Allegato A3 della DGR 476/2021), il potenziale di liquefazione locale, necessario per le valutazioni sul rischio per i manufatti esistenti e di previsione.

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.4.2), 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 riferibile agli approfondimenti di “livello 1”, pertanto gli areali omogenei individuati derivano da approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. Le indagini effettuate per questo studio e gli approfondimenti svolti di “livello 2” hanno comunque contribuito alla stesura di questa fondamentale cartografia.

La cartografia di microzonazione può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”. Per il Comune di Castenaso, lo studio sismico di “livello 2” ha permesso di valutare i fattori di amplificazione sismica mediante approccio semplificato per gli areali di studio comprendenti il territorio urbanizzato e un’ampia fascia esterna. La delimitazione delle MOPS ha invece interessato tutto il territorio comunale.

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 476/2021 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

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

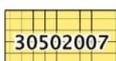
La raccolta ed elaborazione dei dati disponibili ha consentito la suddivisione del territorio studiato in aree qualitativamente omogenee in prospettiva sismica (MOPS). La delimitazione delle MOPS ha tuttavia considerato, in relazione alle caratteristiche sismostratigrafiche locali,

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.

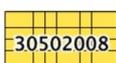
Nel Comune di Castenaso non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si sono distinte sei “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali”, che interessano prevalentemente il territorio comunale meridionale, caratterizzato da depositi più superficiali prevalentemente limosi e argillosi di facies di interbacino e strati granulari a scheletro anche ghiaioso e dunque non liquefacibili. Nello schema seguente si riporta la definizione sintetica della MOPS così classificate:

- 2001** Zona 1 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a -20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.
- 2002** Zona 2 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a -20 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.
- 2003** Zona 3 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza con intervalli sabbiosi insaturi (soggiacenze falda fino a 7-8 metri), intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 metro fino a -15 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >15 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.
- 2004** Zona 4 – Coperture alluvionali limose di media consistenza con intervalli sabbiosi insaturi (soggiacenze falda fino a 7-8 metri), intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 metro fino a -15 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >10 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.
- 2005** Zona 5 – Coperture alluvionali sabbioso ghiaiose superficiali (alveo e depositi terrazzati recenti dell'Idice) poi argille e limi con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 metro e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >10-15 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.
- 2006** Zona 6 – Coperture alluvionali sabbioso ghiaiose superficiali (alveo e depositi terrazzati recenti dell'Idice) poi limi e argille con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.

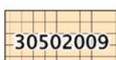
Nel successivo schema si riportano, invece, le definizioni relative alle cinque “zone di attenzione per instabilità” definite per il territorio studiato e riconducibili alla possibilità di fenomeni di liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri e alla presenza di areali interessati da attività di cava con rimaneggiamenti e/o tombamenti di terreni (zona “3080”). Le zone di attenzione per liquefazioni sono state differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici e di facies deposizionale più superficiale.



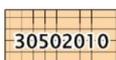
ZA_LQ 7 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a -10 metri e >2 metri fino a -20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.



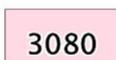
ZA_LQ 8 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a -10 metri e >2 metri fino a -20 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.



ZA_LQ 9 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a -10 metri (tracimazioni recenti di canale indifferenziate) poi argille e limi con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a -20 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.



ZA_LQ 10 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore >1 metro fino a -15 metri e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >10 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico nei depositi alluvionali a profondità >>100 metri.



Zona di attenzione per cedimenti differenziali.

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. 476/2021 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 [$FA_{0,1-0,5s}$]
 - SA2 → 0,4s–0,8s [$FA_{0,4-0,8s}$]
 - SA3 → 0,7s–1,1s [$FA_{0,7-1,1s}$]
 - SA4 → 0,5s–1,5s [$FA_{0,5-1,5s}$] 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:

$$SI1 \rightarrow 0,1s-0,5s [FH_{0,1-0,5s}]$$

$$SI2 \rightarrow 0,5s-1,0s [FH_{0,5-1,0s}]$$

$$SI3 \rightarrow 0,5s-1,5s [FH_{0,5-1,5s}] \text{ solo per le aree di pianura/costa}$$

7.4 Calcolo dei fattori di amplificazione

7.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

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 semplificato mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 476/2021), sulla base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della risposta 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) da ritenersi stabili ma suscettibili di amplificazioni. La tabella riporta esclusivamente i FA e le relative MOPS incluse negli areali interessati dagli approfondimenti di "livello 2". Nella tabella si riportano il macrocontesto attribuibile alla zona MOPS e il parametro Vs30 necessari per il calcolo dei FA.

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

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2002	MARGINE TIPO B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. argilloso limosi con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 m nei primi 20 m e strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >20 m. Substrato sismico a profondità >100 m.
2003	MARGINE TIPO B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. argilloso limosi con intervalli sabbiosi insaturi (soggiacenze falda fino a 7-8 m), intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 m nei primi 15 m e strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >15 m. Substrato sismico a profondità >100 m.

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2004	MARGINE TIPO B	VS30 =250 (Villanova)	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. limosi con intervalli sabbiosi insaturi (soggiacenze falda fino a 7-8 m), intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 m fino a -15 m e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >10 m, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/ limi, sabbie e ghiaie). Substrato sismico a profondità >100 m.
		VS30 =300 (Capoluogo)	1,6	1,7	2,1	2,4	2,3	1,8	2,3	2,4	
2005	MARGINE TIPO B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. sabbioso ghiaiosi superficiali (alveo e depositi terrazzati recenti dell'Idice) poi argille e limi con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore <1 m e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >10-15 m. Substrato sismico a profondità >100 m.
2006	MARGINE TIPO B	VS30 =300	1,6	1,7	2,1	2,4	2,3	1,8	2,3	2,4	Depositi alluvionali prev. sabbioso ghiaiosi superficiali (alveo e depositi terrazzati recenti dell'Idice) poi limi e argille con intervalli sabbioso ghiaiosi discontinui. Substrato sismico a profondità >100 m.

7.4.2 Zone di attenzione per instabilità

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrate come “zone di attenzione per instabilità” per liquefazioni, come indicato negli Standard di MS v. 4.2 (CTMS, 2020). Sono tuttavia 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. Anche in questo caso, la tabella riporta esclusivamente i FA e le relative MOPS incluse negli areali interessati dagli approfondimenti di “livello 2”.

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

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
3050 2008	MARGINE TIPO B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. limoso sabbiosi con frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 m fino a -10 m e >2 m fino a -20 m. Substrato sismico a profondità >100 m.
3050 2009	MARGINE TIPO B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali prev. limoso sabbiosi con frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 m fino a -10 m e >2 m fino a -20 m e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità >20 m. Substrato sismico a profondità >100 m.
3050 1010	MARGINE TIPO B	VS30 =250 (Villanova)	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali limoso prev. sabbiosi con intervalli sabbiosi saturi poco frequenti di spessore >1 m fino a -15 m e con strati sabbioso ghiaiosi discontinui a profondità a profondità >10 m. Substrato sismico a profondità >100 m.
		VS30 =300 (Capoluogo)	1,6	1,7	2,1	2,4	2,3	1,8	2,3	2,4	

7.5 Elaborazione dei valori di Hazard (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 %g), 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 considerando i punti 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 relativamente poco difforni (risultati di H_{SM} variabili da 0,64g a 0,70g) con un blando incremento nel territorio studiato più settentrionale

Tabella 7.3 - Classificazione di H_{SM} per gli intervalli di periodo di riferimento (stralcio tabella 2 riportata nelle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni", CTMS v.2.0)

Intervalli di periodo	Classificazione H_{SM} [g]			
	Basso (ZS_{4SM})	Medio (ZS_{3SM})	Alto (ZS_{2SM})	Molto alto (ZS_{1SM})
$T1_{(0.1-0.5)}$	≤ 0.21	0.22-0.54	0.55-0.85	≥ 0.86
$T2_{(0.4-0.8)}$	≤ 0.14	0.15-0.34	0.35-0.55	≥ 0.56
$T3_{(0.7-1.1)}$	≤ 0.09	0.10-0.22	0.23-0.35	≥ 0.36

Le elaborazioni evidenziano valori relativamente uniformi per gli areali studiati. Sulla base della classificazione di H_{SM} proposta dalla CTMS (tabella 7.3), si ricavano valori di "hazard" da ritenersi complessivamente "alti" in relazione all'intervallo di periodo considerato.

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle Indagini (tavola 1)

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.

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 Castenaso, 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.4.2), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (tavola 2)

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 indagini geognostiche.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2). La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri). Il territorio di studio è stato quindi 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 variabili (da argille e limi a sabbie più o meno limose) in relazione al contesto deposizionale più recente (da depositi di interbacino a depositi di tracimazione fluviale recente). Si rimanda ai capitoli 3 e 5 per i dettagli.

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (assi di paleoalvei)
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (sondaggi/pozzi; punti controllo falda in aree con sabbia)
- ✓ le tracce delle sezioni geologico tecniche di riferimento per questo lavoro.

Terreni di copertura	
	Terreni contenenti resti di attività antropiche
	Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose – argine/barre/canali (es)
	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo – argine/barre/canali (es)
	Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – piana inondabile (pi)
	Argille e argille limose più o meno consistenti – piana inondabile (pi)

Figura 8.1 – Stralcio della legenda della Tavola 2 – Carta geologico-technica. Si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Castenaso

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavola 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, individua con specifica simbologia, le misure tomografiche per classi di frequenza, secondo quanto indicato nella DGR 476/2021, ovvero: $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1 \text{ Hz}$; $1 \text{ Hz} < f_0 \leq 2$; $2 \text{ Hz} < f_0 \leq 8 \text{ Hz}$; $f_0 > 8 \text{ Hz}$.

Le registrazioni HVSr vengono anche classificate 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).

Sono infine riportati per ogni singola misura i valori delle frequenze di risonanza fondamentale f_0 e le eventuali ulteriori frequenze di possibile amplificazione (f_1 e f_2).

Si rimanda al capitolo 5 per un'illustrazione complessiva dei risultati ottenuti dalle registrazioni sismiche HVSr, tuttavia si evidenzia come tutte le misure (salvo alcune registrazioni, inficiate da errori di acquisizione) abbiano ricavato frequenze fondamentali prevalentemente inferiori a 1 Hz, con il massimo picco spettrale correlabile a riflettori sismici situati a profondità >100 metri.

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (tavola 4)

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:10.000, rappresenta la suddivisione del territorio comunale in "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e in "Zone di attenzione per instabilità". Come già descritto, le zone di attenzione sono correlabili a possibilità di liquefazioni (zone 2007 – 2010) e a cedimenti differenziali per la presenza di areali di cava con terreni rimaneggiati e/o tombamenti (zona 3080). Questa cartografia costituisce l'elaborato

fondamentale dello studio sismico di livello 1.

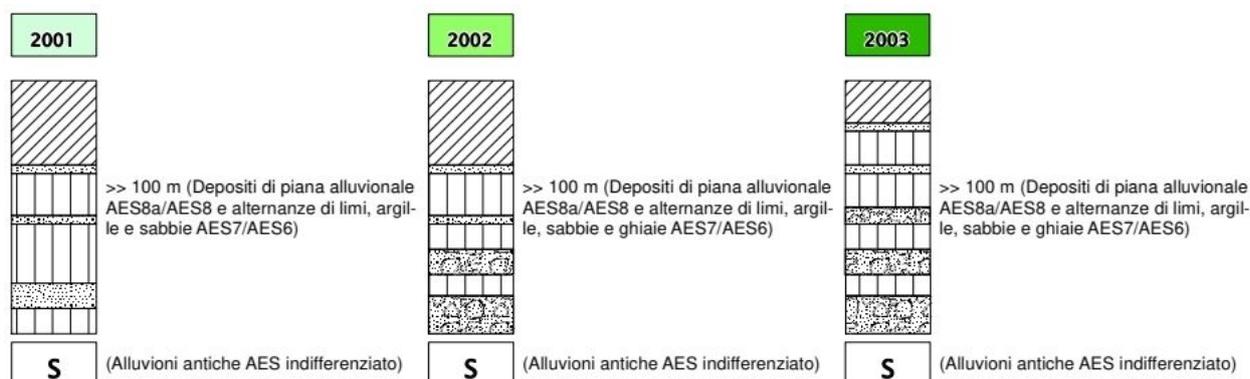
La carta riporta, inoltre, le “forme di superficie e sepolte” (paleoalvei, già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della frequenza fondamentale) e limiti delle aree interessate dalla microzonazione sismica di “livello 2”.

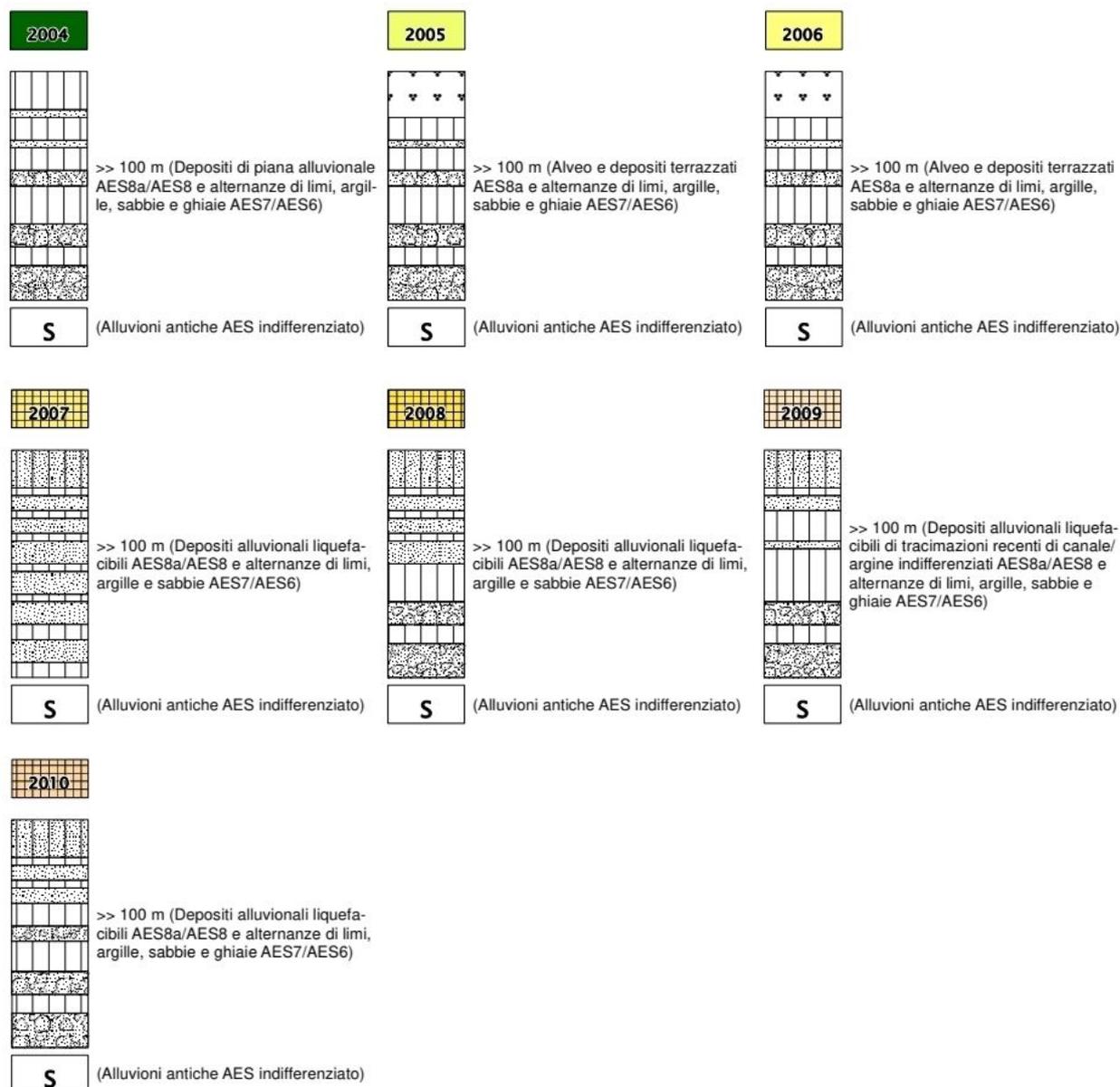
La carta riporta, inoltre, le “forme di superficie e sepolte” (paleoalvei, già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della frequenza fondamentale) e limiti delle aree interessate dalla microzonazione sismica di livello superiore. Rispetto alle 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 risultano distinte sei “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali” (sigle: 2001 → 2006). Vengono inoltre delimitate cinque “zone di attenzione per instabilità”, riconducibili alla possibilità di fenomeni di liquefazione (per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri) e alla presenza di areali interessati da attività di cava con rimaneggiamenti e/o tombamenti di terreni (zona “3080”). Le zone di attenzione per liquefazioni sono state differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici e di facies deposizionale più superficiale.

Per ciascuna zona, in legenda si riportano le principali caratteristiche litostratigrafiche e il contesto deposizionale. Per una descrizione sintetica di tutte le singole zone di rimanda al paragrafo 7.2.

Vengono qui di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici rappresentativi delle MOPS individuate dallo studio di MS comunale:





8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5)

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 tipo di prova (simbologia) e del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ($V_{s_{30}}$). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia valutata con approccio semplificato (DGR 476/2021; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle V_s misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli (in particolare nel capitolo 5) a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2 (tavole da 6 a 13)

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 2>> sono anch'esse elaborate alla scala di dettaglio 1:10.000 e riportano i fattori di amplificazione calcolati per gli areali interessati dalla microzonazione comunale (cfr. paragrafo 1.1). Occorre quindi precisare che la microzonazione di "livello 2" ha interessato soltanto la parte di territorio comunale urbanizzato, un suo ulteriore intorno, nonché gli areali che includono la viabilità di connessione relativa all'analisi delle CLE.

Le cartografie di microzonazione sismica rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente approfondimento di "livello 2" in quanto riportano per ogni zona i fattori di amplificazione calcolati. In questo senso è necessario specificare che sia alle "zone stabili suscettibili di amplificazioni", sia alle "zone di attenzione per instabilità" da liquefazioni vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SA; FA SI) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica predisposti dalla CTMS (v. 4.2). Si rammenta che per gli areali studiati i fattori di amplificazione vengono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 476/2021, allegato A2).

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone MOPS, comprese le zone di attenzione per liquefazioni (rappresentate con specifici retini sovrapposti), i rispettivi parametri di amplificazione.

In sintesi, sono state elaborate le seguenti otto 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 $FA_{0,1-0,5s}$ → 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 $FA_{0,4-0,8s}$ → 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 $FA_{0,7-1,1s}$ → 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 $FA_{0,5-1,5s}$ → 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);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 $FH_{0,1-0,5s}$ → 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 $FH_{0,5-1,0s}$ → 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 $FH_{0,5-1,5s}$ → 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).

8.7 Carta della distribuzione dei valori di H (tavola 14)

La mappa di pericolosità sismica denominata <<Carta della distribuzione dei valori di H_{SM} >> è anch'essa elaborata alla scala di dettaglio 1:10.000 e riporta i valori di H_{SM} (Naso et al., 2019) per gli areali interessati dalla microzonazione sismica di livello 2.

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 %g) come indicato nel paragrafo 7.5.

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.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2014) – *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM.-14, 2014 – ce.memphis.edu.
- 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.
- Città Metropolitana di Bologna – Tavola 4 – *Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali* (foglio 1, scala 1:65.000)
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (dicembre 2020) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2. <https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.

Comune di Castenaso – Quadro Conoscitivo del PSC associato “Valle Idice” (2008)

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>

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>.

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), *CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area*, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

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

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d’Italia, Foglio 221*. 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>.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. – *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report* from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils

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. (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.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madaia C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffre' 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.

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., Brammerini 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.

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.

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.

Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n. 476/2021 (e DGR integrativa n.564/2021)– Aggiornamento dell’“Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017”. Di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019 n.630. BURERT n. 137 del 12/5/2021 (parte seconda) e BURERT n. 111 del 20/04/2021.

Robertson P.K. – *Performance based earthquake design using the CPT – Keynote Lecture*, International Conference on Performance–based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS–Tokyo, 2009.

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>.

Sonmez H. – *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction–prone area (Inegol–Turkey)*. 2003. Environ Geology 44(7): 862–871

Zhang G., Robertson P.K., and Brachman R.W.I. – *Estimating liquefaction–induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*.