



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Regione Emilia-Romagna
Comune di Sant'Agostino (FE)



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	02/05/2019

Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	5
1.3	Elaborati prodotti	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	7
2.1	Sismicità storica	8
2.1.1	La sequenza del 2012	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche	17
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	19
3.1	Quadro geografico geomorfologico	19
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	21
3.3	Contesto strutturale	23
4	Dati geognostici e geofisici	28
4.1	Indagini di repertorio.....	28
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	29
4.2.1	Indagini realizzate in situ	30
5	Modello del sottosuolo.....	31
5.1	Substrato	33
5.2	Terreni di copertura.....	36
5.2.1	Quaternario Marino.....	36
5.2.2	Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo).....	37
5.2.3	Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)	38
6	Interpretazioni e incertezze	40
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	40
6.2	Substrato rigido	41
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	46
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	47
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	48
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	48
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	62

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	62
8	Elaborati cartografici.....	69
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1)	70
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)	71
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	71
8.2.2	Terreni di copertura.....	72
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	73
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	74
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	77
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9).....	78
9	Commenti finali e criticità.....	80
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	80
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	82
9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione	84
9.4	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	85
10	Bibliografia	87
11	Allegati	94

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

<i>Coordinamento dello studio di Microzonazione Sismica:</i>	dott. geol. Luca Minarelli
<i>Redazione della relazione:</i>	dott. geol. Luca Minarelli prof. Marco Stefani dott. geol. Massimiliano Fazzini dott. Davide Franciosi
<i>Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:</i>	dott. geol. Luca Minarelli dott. geol. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	dott. geol. Luca Minarelli dott. geol. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione dei dati stratigrafici:</i>	prof. Marco Stefani dott. geol. Luca Minarelli
<i>Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:</i>	dott. geol. Luca Minarelli

1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino è stato alquanto articolato ed ha visto la partecipazione diretta del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e di alcune Università e gruppi di ricerca nazionali.

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013).

Contestualmente, visti gli ingenti danni e gli estesi fenomeni di liquefazione osservati, il Comune di Sant'Agostino ha ritenuto opportuno commissionare al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara ulteriori approfondimenti di microzonazione sismica. Tali studi, estesi all'intero territorio comunale, furono realizzati sulla base dei previgenti criteri di microzonazione sismica regionale previsti dalla D.A.L. 112/2007.

Con Determinazione di Giunta Regionale n. 17050/2016, sono stati infine destinati al Comune di Sant'Agostino i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con approfondimenti di terzo livello ed analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (C.L.E.).

Questa fase conclusiva del percorso di microzonazione fornisce l'occasione per aggiornare i contenuti dei precedenti studi adeguandoli agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed agli attuali "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" della D.G.R. 2193/2015.

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Lo studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Comune di Sant'Agostino è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 573/2016 avente come oggetto "O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi".

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- “Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), da qui in avanti “Standard MS 4.0b”;
- “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti “ICMS”.

Nella redazione dello studio si è fatto ulteriore riferimento alle seguenti norme:

- Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 2193/2015 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Ferrara relativa ad “ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale”, adottata dal Consiglio Provinciale il 29 maggio 2014. Tale variante contiene, all’interno del proprio Quadro Conoscitivo, un documento relativo la sismicità in Provincia di Ferrara;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- D.M. del 16 gennaio 2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna “Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica” e relativi elaborati prodotti.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni o cedimenti eventualmente innescati in caso di sisma.

La finalità principale di uno studio di microzonazione sismica consiste nel giungere alla suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento. Obiettivo specifico degli approfondimenti di terzo livello è invece l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili.

In un contesto di pianura alluvionale come quello in esame, ciò si applica mediante valutazione approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione attesa e stima degli indici di rischio legati alle aree soggette a liquefazione e densificazione.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Gli studi di microzonazione sismica si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione. Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. 2193/2015) tali studi, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/2008), devono interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali.

Gli ambiti interessati dagli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica ricalcano esattamente quelli utilizzati nei precedenti studi (Ordinanza 70/2012), in accordo con quanto stabilito con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna e con il "Settore 7° - Urbanistica" del Comune di Sant'Agostino.

1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dagli archivi digitali contenenti i dati informatizzati ad esse associate.

La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; essa illustra i criteri adottati per studio, descrive le metodologie d'analisi dei dati ed i risultati del percorso di microzonazione, oltre ad inquadrare il territorio nel contesto geologico e sismotettonico regionale.

Nel complesso il presente studio di microzonazione sismica è costituito da:

- 9 Tavole cartografiche, compiutamente descritte al capitolo 8;
- 3 Sezioni geologiche (Allegato 1);
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione (Allegato 2);
- Rapporti delle verifiche puntuali di suscettibilità a liquefazione (Allegato 3);
- Relazione illustrativa.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato A2 della D.G.R. 573/2016 avente come oggetto "O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi".

Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile dal titolo "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

4.0b" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. L'obbligo di attenersi in maniera rigorosa ai suddetti standard, ha vincolato lo studio di microzonazione sia a livello di organizzazione della relazione illustrativa, in tema di contenuti, titoli ed ordine dei capitoli trattati, sia a livello cartografico, in merito a numerazioni, tematismi, layout, legende e font utilizzati nelle diverse tipologie di elaborati prodotti.

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al proprio assetto tettonico - strutturale, dunque alla presenza di quelle che vengono definite strutture "geologicamente attive". Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio, oltre alle conoscenze legate all'evoluzione delle principali strutture deformative esistenti, risultano fondamentali anche quelle relative alla storia sismica del territorio stesso, cioè tutte le informazioni riguardanti i terremoti avvenuti in epoca storica e gli effetti ad essi associati. L'inquadramento sismotettonico dell'area è stato pertanto realizzato anche attraverso la consultazione di diversi database pubblici, sviluppati da vari Enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che raccoglie dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 (Locati *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DISS versione 3.2.1 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS Working Group, 2018; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite segmenti o aree georeferenziate che indicano rispettivamente singole faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite). Per ognuna delle sorgenti il database contiene informazioni che consentono la ricostruzione tridimensionale della struttura sismogenetica;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi; tale portale, attualmente in fase di dismissione, sarà sostituito dal nuovo sito del Centro Nazionale Terremoti raggiungibile al seguente indirizzo: <http://cnt.rm.ingv.it/>;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006; <http://csi.m.ingv.it/>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni *et al.*, 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta, per numerose località, i risentimenti di circa 300 tra i più forti terremoti storici italiani, e fornisce informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti. Nel catalogo sono anche presenti dati relativi ai parametri epicentrali, ad effetti locali sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>), che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, 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 che ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale.

2.1 Sismicità storica

La ricostruzione della sismicità storica del territorio di Sant’Agostino è stata effettuata basandosi innanzitutto sull’analisi del Database Macrosismico Italiano - DBMI15 (Locati *et al.*, 2016), il quale consente la consultazione online dei dati macrosismici di tutte quelle località a cui sono associate osservazioni di danno riferibili ad almeno 3 eventi sismici nella finestra temporale 1000-2014.

In relazione al Comune di Sant’Agostino il database contiene solamente 10 record relativi ad eventi sismici storici (Tabella 2-1 e Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono stati quindi riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l’area epicentrale, il numero di Macroseismic Data Point (NMDP), l’intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	Io	Mw	IMCS SANT'AGOSTINO
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1951	05	15	22	54		Lodigiano	179	6-7	5.17	IV
1963	04	05	13	49	4	Finale Emilia	6	4-5	3.93	IV
1963	08	09	06	05		Romagna	16	5	5.23	III
1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51	V
1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	V
1987	05	08	11	10	2	Bassa modenese	24	6	4.44	IV
1989	09	13	21	54	0	Prealpi vicentine	779	6-7	4.85	IV
2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	6-7	4.40	NF
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	V
2012	05	29	7	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Sant'Agostino, in occasione dei principali eventi, tratti dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016). Alcuni effetti non sono esprimibili tramite scala MCS per cui vengono utilizzati codici alternativi come: F = avvertito (felt) in caso in cui si ritenga di escludere che si siano verificati danni ($3 \leq IMCS \leq 5$); NF = non avvertito (not felt) in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a IMCS = 1).

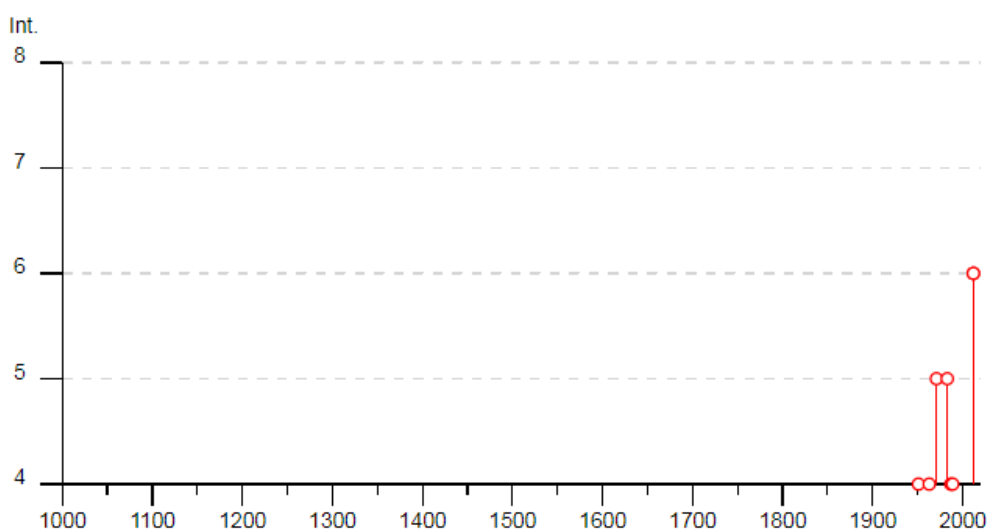


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 5$ attribuite al Comune di Sant'Agostino, dall'anno 1000 al 2014, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2016).

GRADO	SCOSSA	DESCRIZIONE DEGLI EFFETTI
IV	Moderata	Avvertita da molte persone, tremito di infissi e cristalli, leggere oscillazioni di oggetti appesi.
V	Piuttosto forte	Avvertita anche da persone addormentate, caduta di oggetti.
VI	Forte	Qualche leggera lesione negli edifici e finestre in frantumi.
VII	Molto forte	Caduta di fumaiole, lesioni negli edifici.
VIII	Rovinoso	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.

Tabella 2-2 - Stralcio della scala delle intensità macrosismiche Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Come è possibile notare dai dati disponibili, i più recenti terremoti a maggiore intensità con epicentro nelle vicinanze dell'area di studio sono quelli che si sono verificati il 20 ed il 29 maggio 2012, con valori di intensità macrosismica osservati nel territorio comunale rispettivamente di V e di VI grado.

Nonostante non sia riportato nella Tabella 2-1 probabilmente a causa dei rari edifici presenti nell'area e pertanto di sporadici punti di osservazione macrosismica, il territorio è stato certamente e fortemente interessato anche dal terremoto del 1570, con epicentro a Ferrara.

Di quest'ultimo terremoto, verificatosi il 17 novembre 1570, con intensità epicentrale pari al VII-VIII grado e magnitudo momento pari a 5.44, si riporta di seguito un estratto dal catalogo CFTI4med dei commenti storico-critici e delle descrizioni degli effetti locali.

I maggiori effetti del sisma sono ampiamente riportati nelle fonti ferraresi *che ricordano concordemente una lunga serie di scosse iniziata nelle prime ore del 17 novembre e continuata per tutta la giornata. Le quattro più forti sono ricordate con precisione oraria: la prima avvenne alle ore 9:30 italiane (1:40 GMT ca.) e causò il crollo di molti merli, terrazzini e comignoli, che cadendo danneggiarono molti tetti. Numerose repliche si susseguirono durante la stessa notte e nella mattinata successiva; fra queste le più forti furono quella delle ore 20 italiane (12:10 GMT ca.), che scosse violentemente le case, lesionando leggermente le murature, e quella delle ore 24 (16:10 GMT ca.), che causò il crollo di comignoli e cornicioni e gravi lesioni nelle murature. La scossa principale avvenne alle ore 3 (19:10 GMT ca.), colpì edifici già notevolmente lesionati e sconnessi e causò i danni più gravi. A Ferrara fu danneggiata soprattutto la parte medievale della città, dove alcuni edifici crollarono totalmente e quasi tutti gli altri subirono caduta di muri e tetti, lesioni e sconnessioni di pareti, che resero in gran parte inagibili sia gli edifici pubblici, sia le abitazioni private. I danni maggiori riguardarono gli edifici sviluppati in altezza: chiese, campanili, palazzi con soffitti a volta. Le scosse colpirono soprattutto gli edifici posti all'estremità delle vie, che non erano sostenuti da altre costruzioni. Diversi dettagli si hanno anche sull'edilizia privata: risulta danneggiato circa il 40% delle abitazioni. Fuori dalla città, in un raggio di circa 15-20 km, notevoli danni subirono circa 30 paesi e villaggi della campagna, dei quali sono documentati soprattutto i danni agli edifici religiosi. La scossa fu sentita in una vasta area comprendente le principali città emiliane, Milano, Padova e Venezia a nord; Pesaro a sud. Il quadro complessivo degli effetti è cumulativo delle scosse del 17 novembre. Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte, fino ai primi mesi del 1572, dalle fonti, tra le quali molteplici lettere degli ambasciatori presenti a Ferrara rintracciate negli archivi di Firenze, Urbino, Mantova, Torino. Qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574.*

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Le fonti storiche riportano anche evidenze di effetti geologici di sito legati al sisma, come i fenomeni di *liquefazione del terreno nell'area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze (in alcuni casi con emissione di fumi o con fuoriuscita di sabbie bollenti) e apertura di fessure con fuoriuscita di "una schiuma nera"*. Tra gli effetti viene anche riportato come *presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini*.

In Figura 2-2 è riportata in mappa la distribuzione degli effetti macrosismici relativi al terremoto del 17 novembre 1570. Il territorio di Sant'Agostino appare privo di osservazioni macrosismiche cosa che appare alquanto inverosimile vista l'ubicazione epicentrale e la distribuzioni dei valori di intensità nei territorio limitrofi compresi tra il 6-7 e 7-8 grado delle scala MCS.

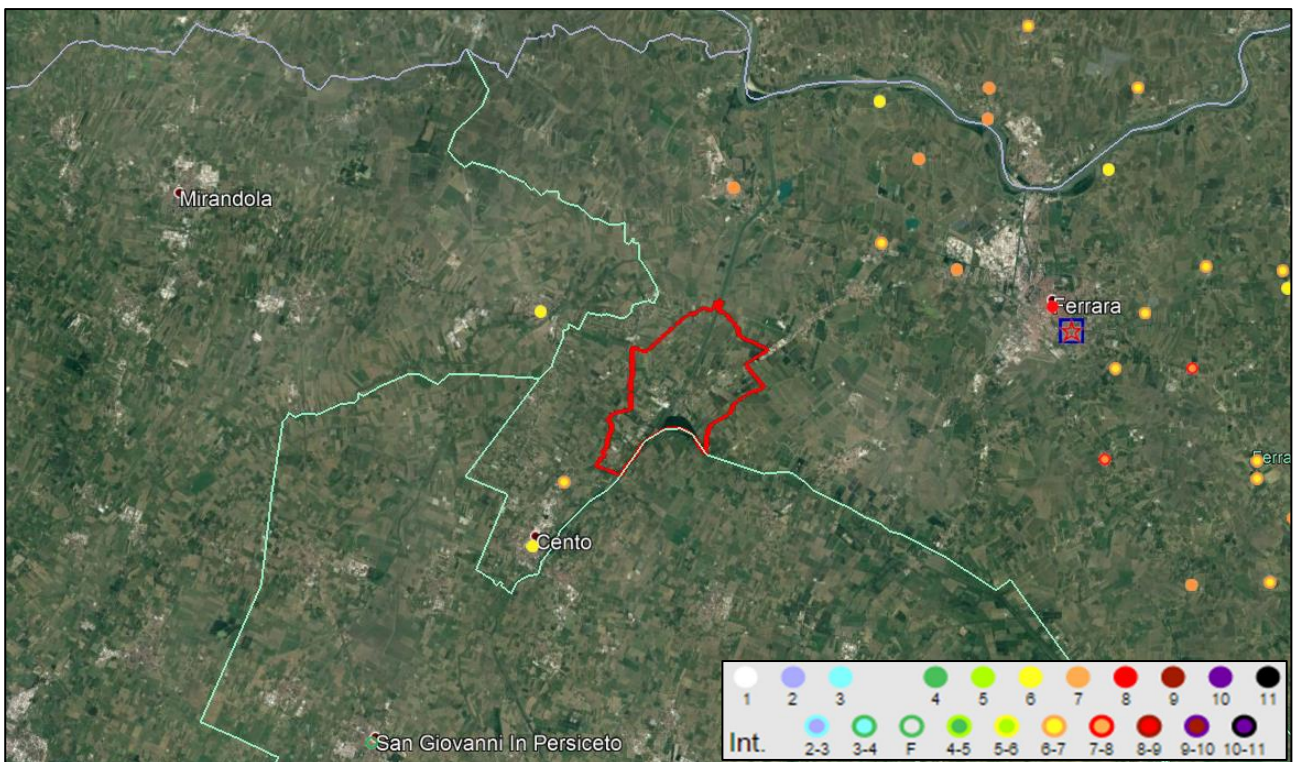


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Sant'Agostino.

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,125 - 0,175 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

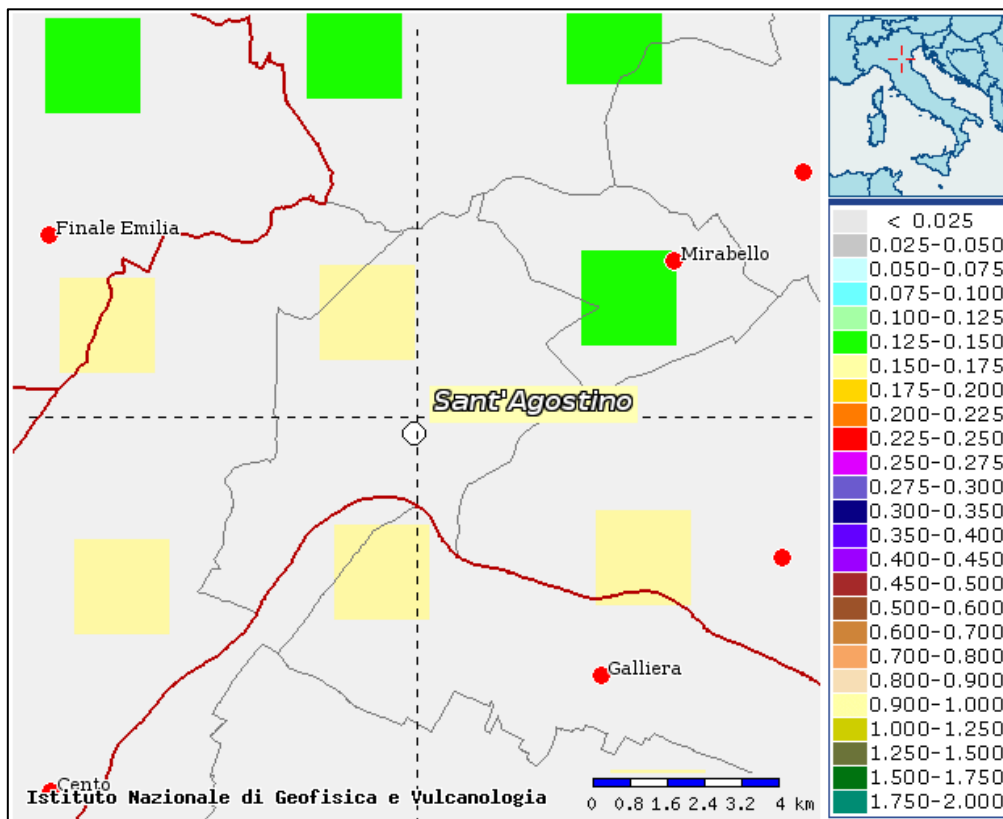


Figura 2-3 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il maggio ed il giugno 2012 un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale M_L pari a 5.9, si è verificata il 20 maggio alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro ($44^{\circ}51'50''$ N, $11^{\circ}14'31''$ E, profondità 6,3 km - Figura 2-4), mentre la seconda, di M_L pari a 5.8, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale con epicentro tra Mirandola e Medolla, ($44^{\circ}50'00''$ N, $11^{\circ}03'37''$ E, profondità 13,5 km - Figura 2-4) (Massa *et al.*, 2012).

Scosse successive hanno interessato un'area estesa oltre 50 km in direzione Est - Ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_w \geq 5,0$, aventi epicentri distribuiti tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-4), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1,5$ (Figura 2-4).

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghie Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghie e sovrascorrimenti a vergenza nord-orientale che coinvolgono sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria che la successione carbonatica Mesozoica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

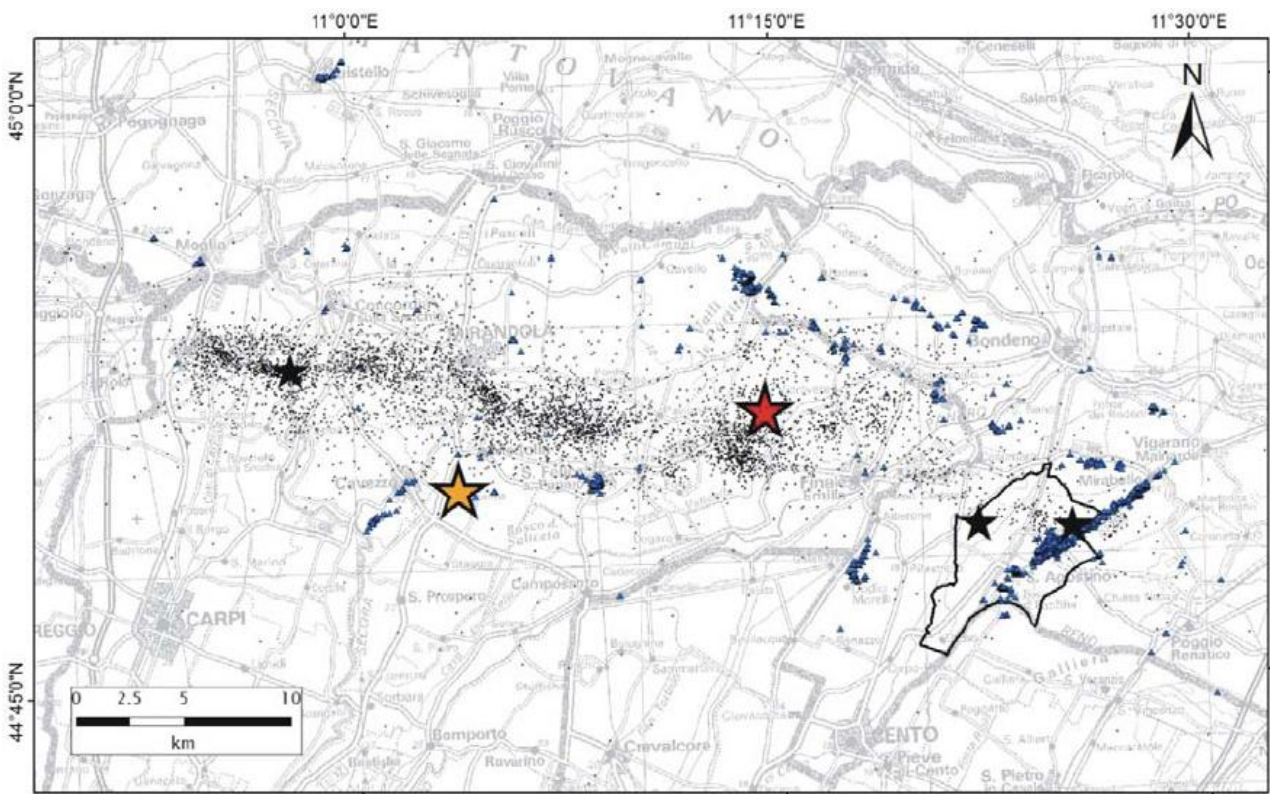


Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con $M_w \geq 5.0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergo Working Group, 2012; Gdl Liquefazione RER, 2012). La linea nera delimita il territorio di Sant'Agostino.

I risultati di diversi studi sui meccanismi focali degli eventi principali suggeriscono una cinematica di tipo compressivo, quindi un movimento delle faglie sepolte lungo piani orientati essenzialmente Est - Ovest ed immergenti verso Sud (Pondrelli *et al.*, 2012; Scognamiglio *et al.*, 2012). Questi dati sono in accordo con quanto emerso da studi del campo di velocità derivato da misure GPS (Devoti *et al.*, 2011) e dagli indicatori del campo di stress agente su questa area (Montone *et al.*, 2012).

I rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato, per il territorio di Sant'Agostino, valori di intensità macrosismica pari al V ed VI grado della Scala MCS. Le mappe di distribuzione degli effetti macrosismici dei singoli eventi (Figura 2-5 e Figura 2-6) mostrano come i maggiori risentimenti delle scosse siano concentrati nella parte settentrionale del territorio con intensità pari al VI-VII grado MCS, mentre nel capoluogo sono raggiunti valori di intensità macrosismica del VI grado MCS.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

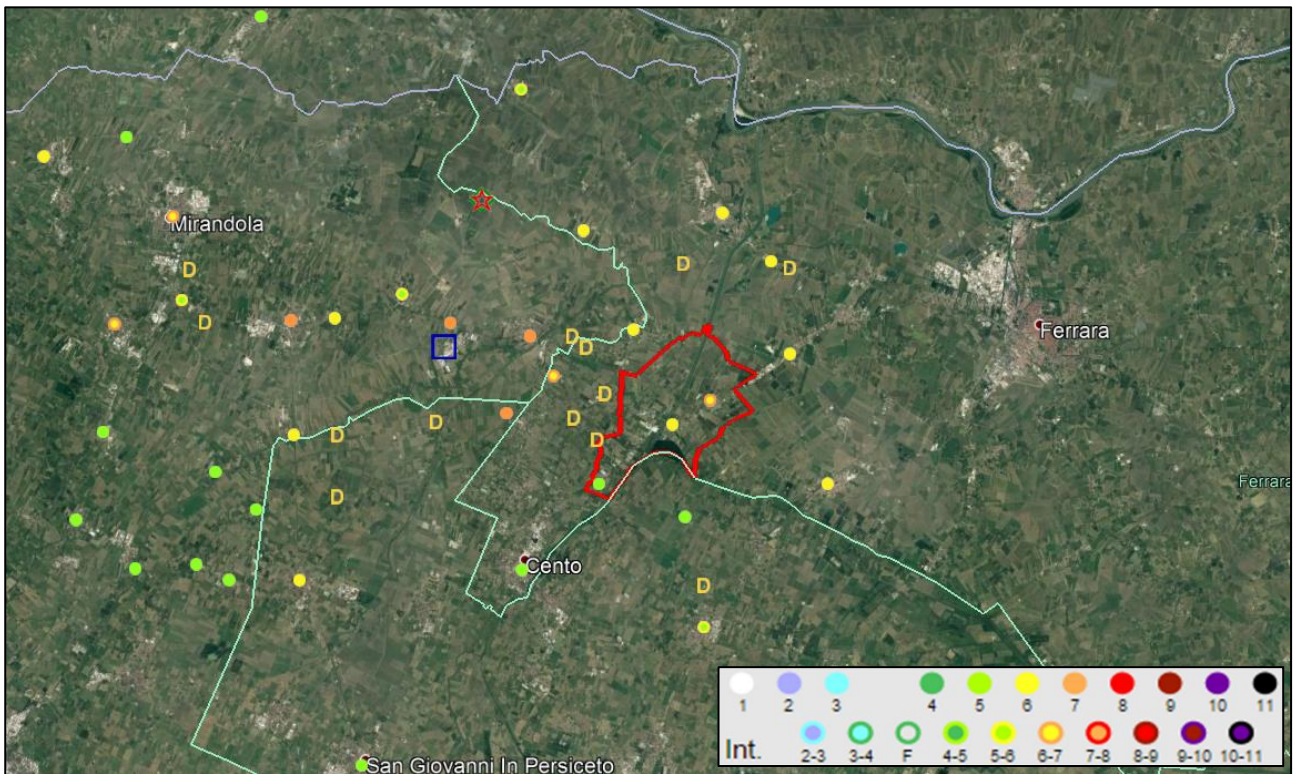


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Sant'Agostino.

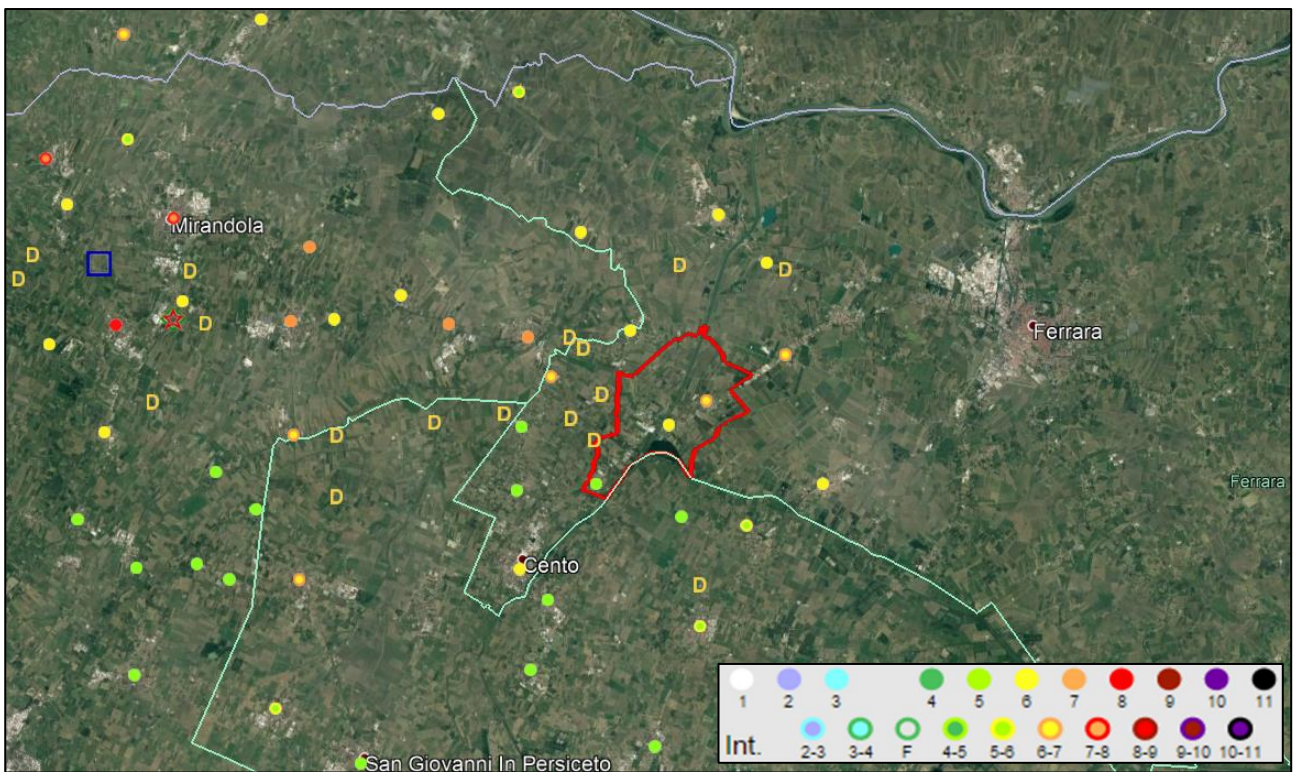


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Sant'Agostino.

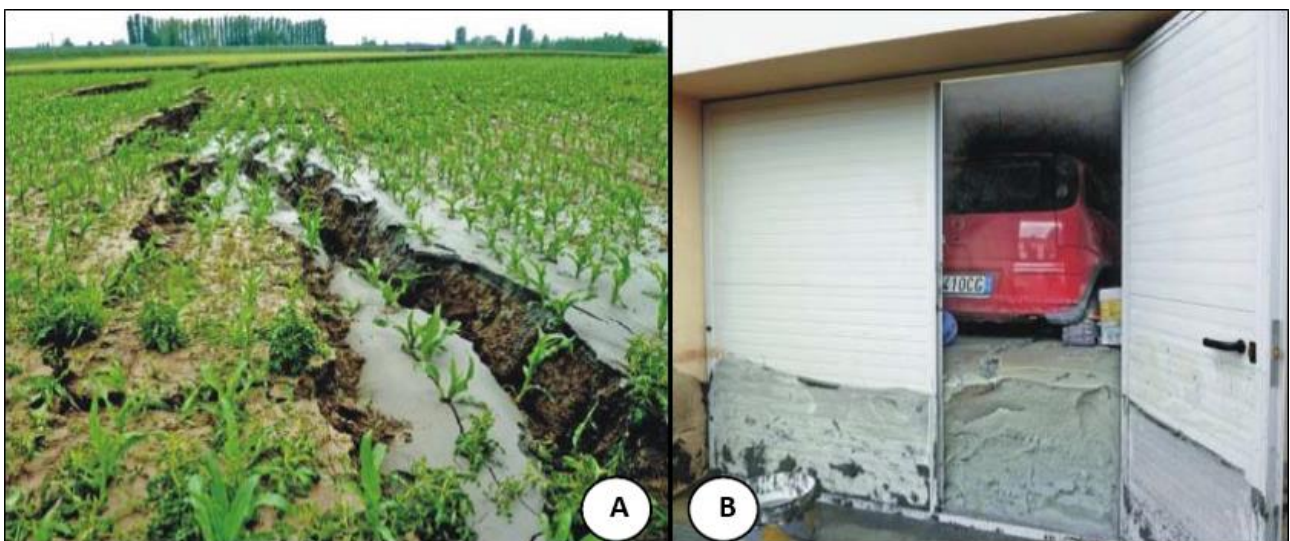
MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Nel territorio, duramente colpito dalla sequenza sismica del 2012, sono state verificate numerose lesioni e crolli parziali su larga parte degli edifici storici pubblici e privati, con danneggiamenti dei paramenti murari ed in corrispondenza delle connessioni tra la copertura e gli elementi strutturali degli edifici stessi. Gravi danni hanno, inoltre, interessato svariati edifici produttivi come ad esempio quelli della Ceramica Sant'Agostino ed dalla Tecopress. Crolli, anche completi, hanno interessato invece diversi edifici agricoli, anche abbandonati.

I danni più ingenti al patrimonio storico ed artistico hanno riguardato le parrocchiali di Sant'Agostino e Dosso ed alcuni ambienti di quella di San Carlo, oltre ai relativi complessi cimiteriali. Completamente distrutto è apparso l'oratorio Ghisilieri, mentre crolli parziali hanno interessato il Palazzo Quattro Torri e la Residenza Municipale di Sant'Agostino, successivamente abbattuta. Duramente colpito dal sisma anche il settore scolastico, con 3 edifici su 4 dichiarati inagibili.

Importanti effetti di sito osservati durante le due principali scosse della sequenza emiliana, sono stati l'amplificazione del moto sismico ed i fenomeni di liquefazione, diffusi in corrispondenza di antichi alvei fluviali, oggi abbandonati e sepolti.

Localmente associati a dissesti gravitativi cosismici, i fenomeni di liquefazione sono stati particolarmente evidenti presso l'abitato di San Carlo in concomitanza delle scosse del 20 maggio 2012. Tali fenomeni hanno indotto gravi danni agli edifici ed alle strutture industriali, ed ai loro sistemi fondali, oltre che danneggiato le infrastrutture stradali e le reti dei sottoservizi. Oltre alle eruzioni puntuali e lineari di sabbie dal sottosuolo sono stati osservati altri effetti cosismici secondari quali fratture superficiali, dislocazioni laterali e cedimenti differenziali (Caputo e Papathanassiou, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012; Emergeo Working Group, 2013).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

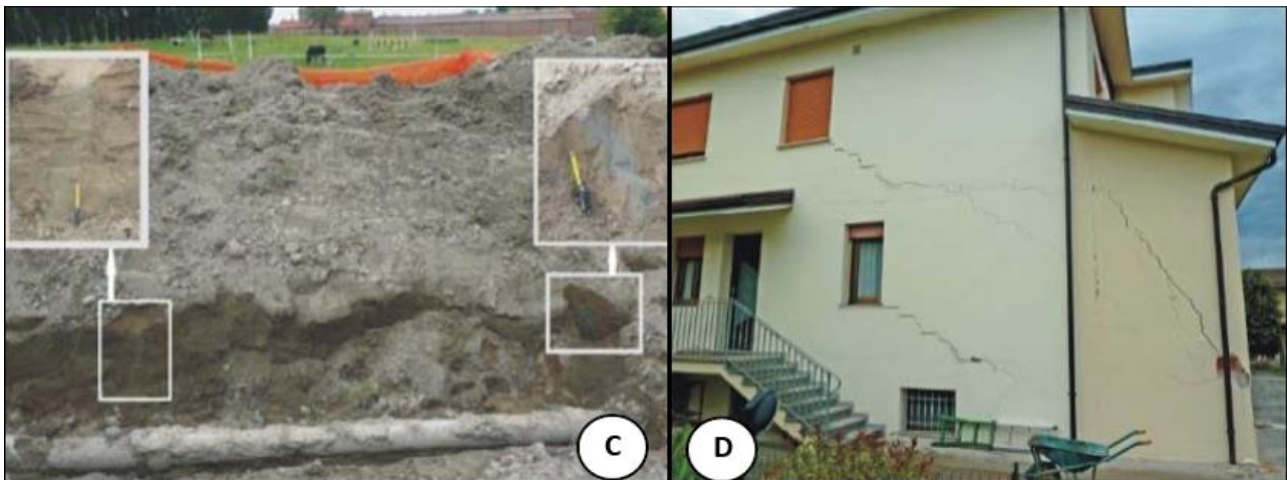


Figura 2-7 - Esempi di fenomeni superficiali dovuti alla liquefazione indotta dal terremoto del 20 maggio. A) fratture con movimenti gravitativi ed eiezione di sabbia; B) eruzione di sabbia da un pavimento all'interno di un garage costruito in corrispondenza di un vecchio pozzo per acqua; C) rotture di tubazioni; D) cedimenti differenziali di fondamenta e conseguente danneggiamento di edificio.

Lo spessore delle sabbie accumulate in superficie è stato valutato in circa 40 cm nei campi, sino ad oltre 1 m in alcuni garage ed appartamenti di San Carlo (Figura 2-7) (Emergeo Working Group, 2013). Le fratture superficiali hanno invece avuto estensioni da pochi centimetri a più di 10 m e in alcuni casi fino ad oltre 50 m. La larghezza di tali fratture è stata invece più contenuta, da pochi centimetri sino ad un massimo di circa 30-40 cm (Lai *et al.*, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; Emergeo Working Group, 2013).

La maggior parte delle fuoriuscite di sabbia si è verificata attraverso fratture e spaccature apertesesi nei campi e nella pavimentazione stradale, mentre il numero di vulcanelli di sabbia è stato significativamente minore delle aree fratturate (Papathanassiou *et al.*, 2012). Il Riguardo questi ultimi, il diametro massimo osservato era di circa 10 m, ma quando coalescenti si potevano estendere per oltre 50 m.

In alcune trincee e scavi realizzati per riparare i danni ai sottoservizi, sono state osservate fratture e dicchi riempiti di materiale sabbioso che non hanno raggiunto la superficie. Ciò indica che la liquefazione può provocare danni anche quando non si manifesta direttamente in superficie.

L'enorme quantità di materiale fuoriuscito a San Carlo ha prodotto cedimenti differenziali in superficie, dovuti allo svuotamento parziale ed alla compattazione dei livelli sepolti andati in liquefazione (Emergeo Working Group, 2013).

Un altro importante effetto di sito osservato durante la sequenza sismica emiliana è l'amplificazione del moto del suolo. Secondo la mappa di pericolosità sismica di riferimento (Figura 2-3), nelle aree epicentrali l'accelerazione massima attesa su suolo rigido pianeggiante è compresa tra 0,150 - 0,175 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. In realtà, le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

temporanee installate immediatamente dopo le scosse del 20 maggio, hanno registrato valori di accelerazione orizzontali in superficie superiori a 0,2 g e localmente anche a 0,3 g; tali accelerazioni, anche di molto superiori rispetto a quelli attese, sono state determinate da evidenti fenomeni di amplificazione stratigrafica del moto sismico.

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2018) mostra come la parte settentrionale del territorio di Sant'Agostino sia interessata dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS103, mentre la parte meridionale è interessata dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS051 (Figura 2-8).

La prima struttura, denominata Finale Emilia - Mirabello, si estende verso occidente in direzione di Mirandola con orientazione Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, e comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6.1, profondità tra 4 e 8.4 km e slip-rate compreso tra 0.25 e 0.5 mm/anno.

La seconda struttura invece, denominata Carpi - Poggio Renatico ed anch'essa orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6, profondità tra 4 e 7 km e slip-rate compreso tra 0.5 e 1.04 mm/anno.

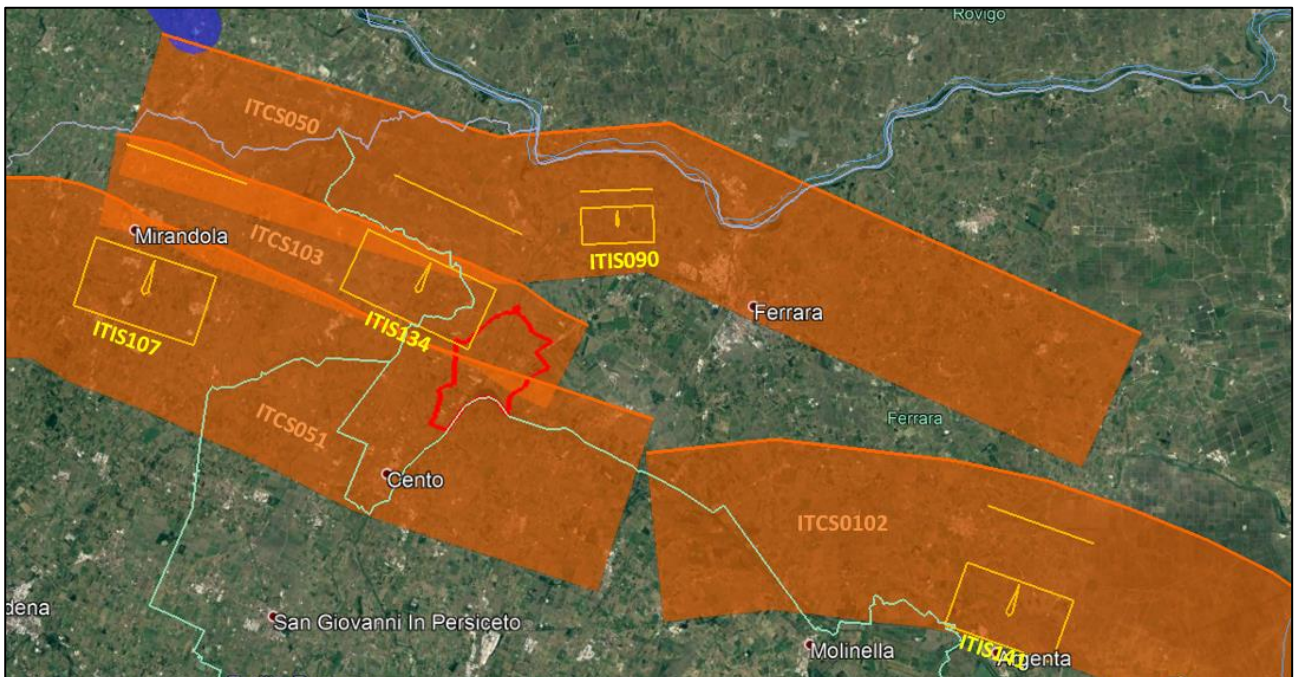


Figura 2-8 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è rappresentato il territorio di Sant'Agostino.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

L'area di studio è inoltre bordata, a Nord ed ad Est, da altre due sorgenti sismogenetiche composte anch'esse approssimativamente orientate Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest e denominate rispettivamente Poggio Rusco - Migliarino (ITCS050) e Malalbergo - Ravenna (ITCS102).

Quella a Nord delimita il settore esterno delle Pieghe Ferraresi e comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), a cui è assegnata una Mw_{max} pari a 5.5, profondità tra 1.4 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno; quella ad Est invece comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141).

Rispetto alle sorgenti individuali citate invece, mentre quella di Mirandola, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già conosciuta sia in base a prospezioni geologiche profonde, sia mediante osservazione di anomalie nel reticolo idrografico, quella di Finale Emilia invece è stata proposta sulla base della localizzazione dell'evento del 20 maggio 2012.

In relazione all'esistenza della sorgente individuale di Ferrara infine, questa è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012), sia da attività tettonica "relativamente recente", alla quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570. L'ubicazione della sorgente è stata proposta in base ad anomalie del reticolo idrografico, in particolare alla deviazione dell'alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione indotta dall'attività tettonica della struttura sepolta.

Nonostante siano tra le meglio documentate tra quelle presenti nel sottosuolo della pianura, per le strutture sismogenetiche appartenenti all'Arco Ferrarese permangono interrogati relativi ai tempi di ritorno degli eventi associati alle sorgenti individuali ed alla magnitudo massima attesa per l'area sottesa alla sorgente composta.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il territorio di Sant'Agostino ricade dentro alla Zona 912 "Dorsale Ferrarese", caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6,14 (Figura 2-9).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

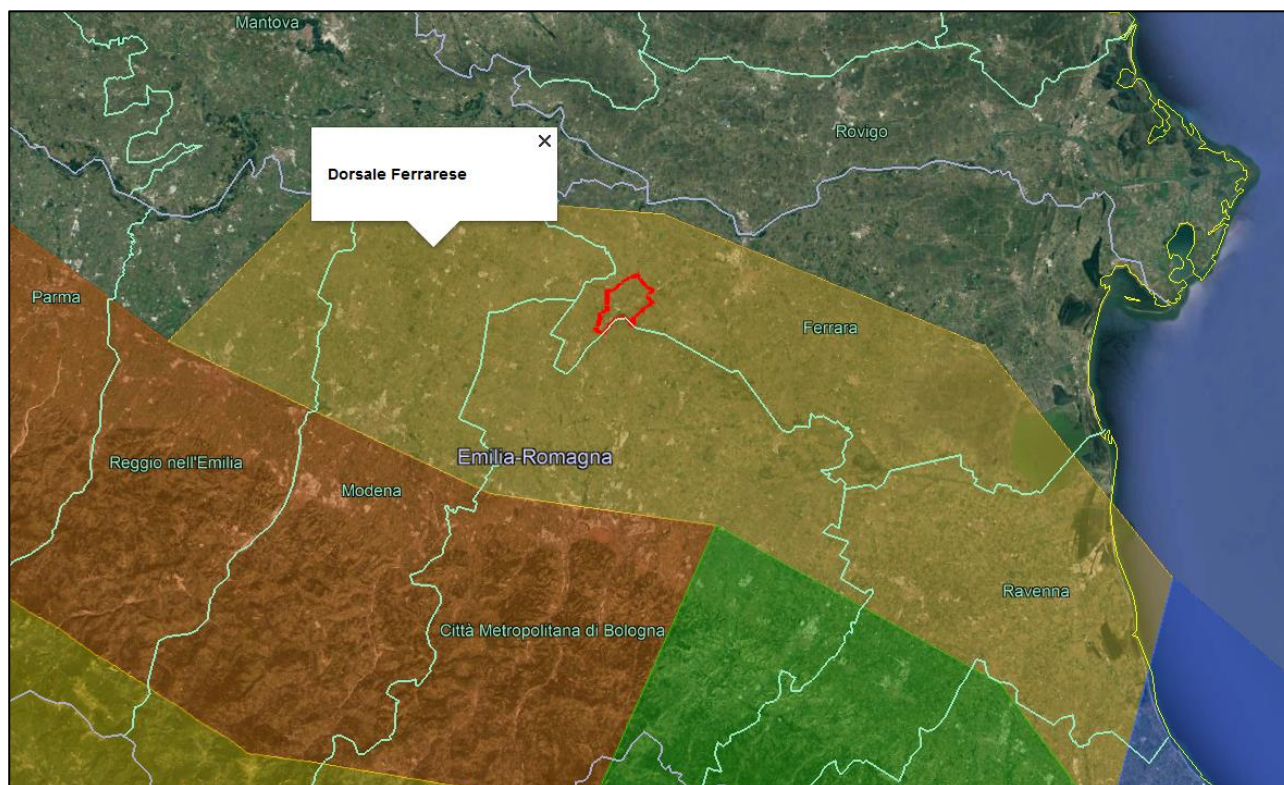


Figura 2-9 - Ubicazione del territorio comunale di Sant'Agostino (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti sono delineati i caratteri geografici, geologico-geomorfologici e tettonici dell'area con particolare riguardo alla successione sedimentaria che costituisce il sottosuolo del territorio del Comune di Sant'Agostino.

3.1 Quadro geografico geomorfologico

L'area analizzata è posta nella porzione sud-occidentale della Provincia di Ferrara al confine con quella di Bologna ed è limitata dai territori di Mirabello, Poggio Renatico, Galliera, Pieve di Cento, Cento e Bondeno. Il Comune è intersecato dal Cavo Napoleonico, grande canale scolmatore, scavato nel secondo dopoguerra per mettere in comunicazione Reno e Po.

Il territorio si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale, formata da depositi di fiumi di provenienza appenninica. In particolare, questa area è dominata dai depositi del fiume Reno. La morfologia del territorio è caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali ed corpi di argine naturale che

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

sfumano in depressioni interalvee. Tali caratteristiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di dettaglio (Figura 3-1).

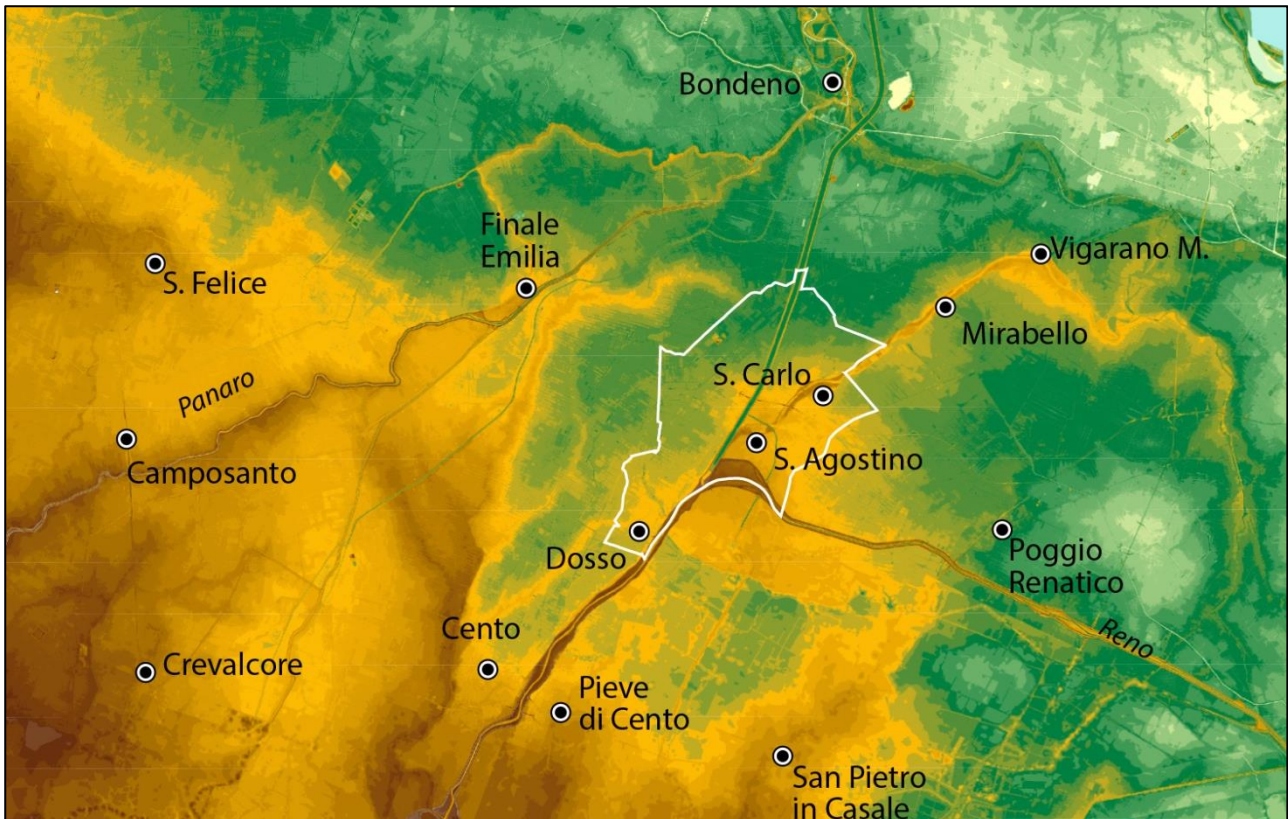


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Evidenti appaiono i numerosi dossi del Reno allungati in direzione sudovest – nordest e limitati da depressioni interalvee (in verde). Altrettanto riconoscibile è la struttura deltizia del Reno medioevale, con canali distributori ramificatisi all'interno di ampio acquitrino continentale.

Questo settore di pianura mostra terreni tra più rilevati di tutta la Provincia di Ferrara, con quote comprese tra 18 a 9 m sopra il livello del mare, che localmente superando i 20 m nella cassa di espansione del Reno della Panfilia.

Nonostante le quote relativamente elevate, il deflusso a mare delle acque in eccesso dipende in gran parte dal sollevamento meccanico. Particolarmente marcato appare il dosso dell'alveo del Reno, che coincide ancora con l'attuale corso del fiume fra Cento e Pieve fino a Sant'Agostino, dove prosegue come forma relitta verso Mirabello e Vigarano Mainarda. Il dosso, formati fra XV e XVIII secolo D.C., è fiancheggiato da ampi ventagli da rotta, particolarmente sviluppati sul lato orientale, e da aree di depressione interalvea estese nella porzione nord-occidentale. Nel territorio considerato, non si osservano forme legate a depositi fluviali di età precedenti al XV secolo, in quanto tali sedimenti sono sempre sepolti nel sottosuolo.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

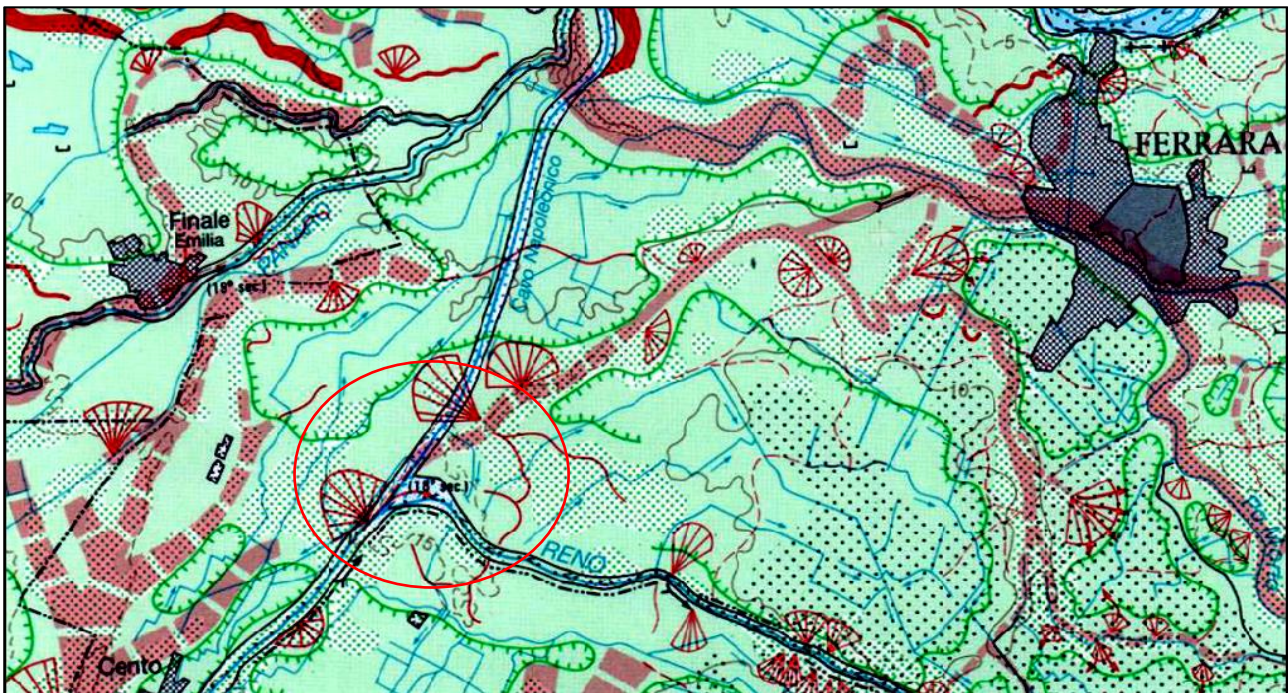


Figura 3-2 - Stralcio dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999), che illustra la complessa alternanza di corpi dossivi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi).

3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012, le conoscenze geologiche erano limitate alla parte centro-meridionale del territorio comunale. Questa area era stata infatti oggetto delle indagini geologiche e cartografiche svolte nell'ambito del Progetto CARG, su cui si basano il Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto" e il Foglio 203 "Poggio Renatico" e le rispettive note illustrative. La parte settentrionale del territorio era invece pressoché priva sia di studi stratigrafici di sottosuolo che di cartografia geologica di superficie.

I primi studi, realizzati durante l'emergenza sismica, hanno gettato le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera generale i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area.

La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012 già indicava come i depositi affioranti fossero costituiti da sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, tutti i sedimenti affioranti nel territorio comunale sono riferibili all'Unità di Modena (AES8a), di età post-romana. Questa unità costituisce la porzione sommitale del Subsistema di Ravenna (AES8), inquadrato a sua volta nella parte terminale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 202 "San Giovanni in Persiceto" e 203 "Poggio Renatico").

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Successivamente, la conoscenza dei corpi geologici affioranti nel territorio comunale è stata notevolmente migliorata ed inquadrata nel contesto geologico della Provincia di Ferrara, grazie alla realizzazione della nuova carta geologica provinciale. La nuova cartografia, realizzata da Geotema S.r.l. nel 2016, è basata sull'analisi di immagini satellitari, modelli altimetrici ed informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche di sottosuolo.

La carta (Figura 3-3) documenta come la porzione sud-occidentale del Ferrarese sia costituita dai grandi corpi sabbiosi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica. Questi corpi si sono in gran parte depositi in età assai recente e sono quindi attribuibili all'Unità di Modena (AES8a). I centri abitati, la rete viaria ed infrastrutturale sono in gran parte sviluppati sul pronunciato dosso sabbioso formato dal Reno tra il XV e XVIII secolo, e sui contigui corpi di argine. Lateralmente, aree più depresse sono formate da sedimenti fangosi depositi in zone interalvee palustri, talvolta interessate da corpi di sabbie e limi da rotta fluviale o da estesi depositi di argille organiche e torbe.

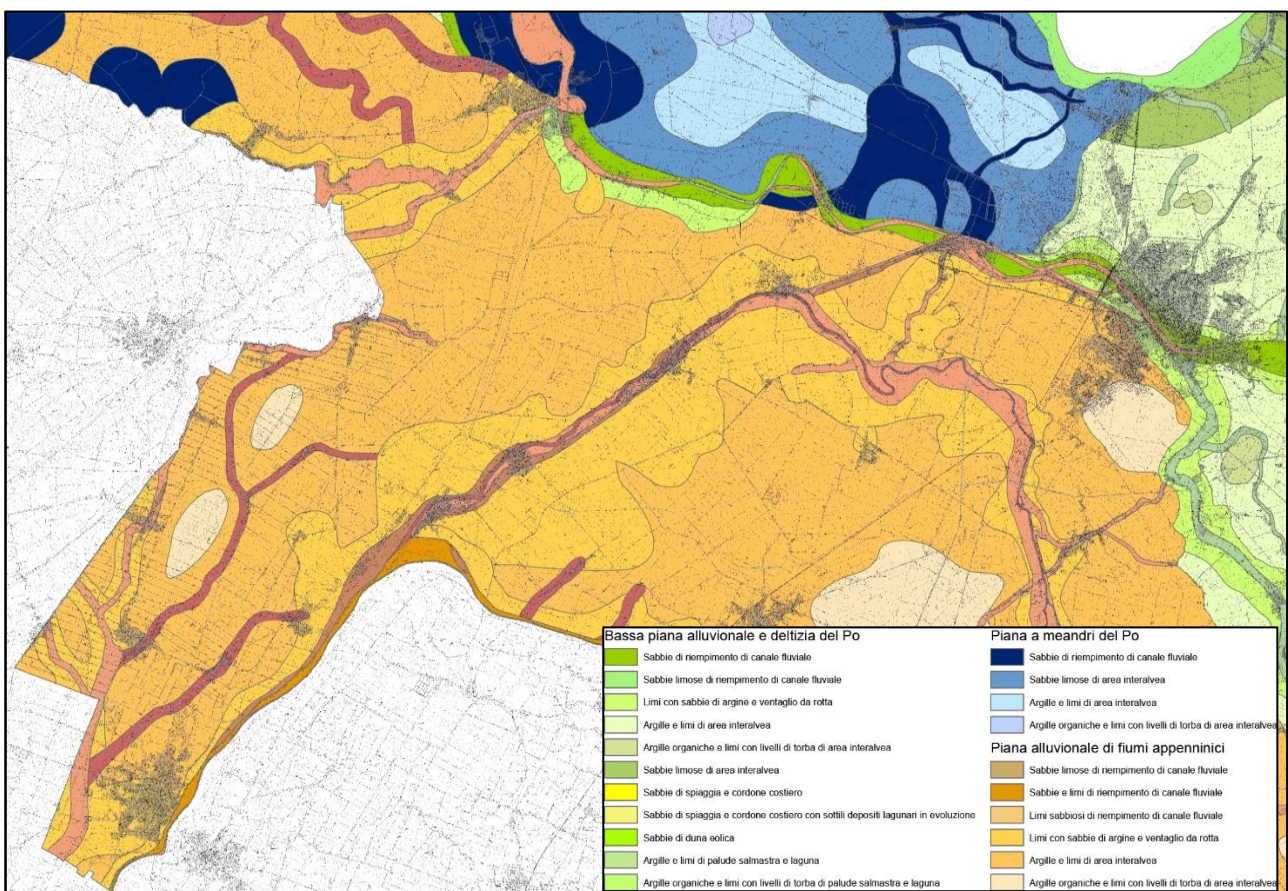


Figura 3-3 - Stralcio della Carta Geologica e Geomorfologica della Provincia di Ferrara (2016), in cui sono visibili i corpi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi appenninici e i corpi depositi dal Po. Il territorio del Comune di Sant'Agostino è prevalentemente sviluppato a cavallo del più recente paleoalveo del fiume Reno. Cartografia accessibile online: <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di avanfossa dell'Appennino, sviluppata tra regione i rilievi appenninici e sudalpini. L'assetto strutturale delle successioni sepolte sotto la Pianura Padana è noto, nelle sue linee generali, grazie a numerosi profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, soprattutto da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, con vergenza settentrionale associati ad anticlinali di rampa e più ampie pieghe sinclinaliche, interposte fra i fasci di sovrascorrimento. Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'Avanfossa Appenninica fra il Neogene e il Quaternario.

Le prospezioni petrolifere hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere (Pieri e Groppi, 1975) due fasci arcuati di pieghe, con concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-4).

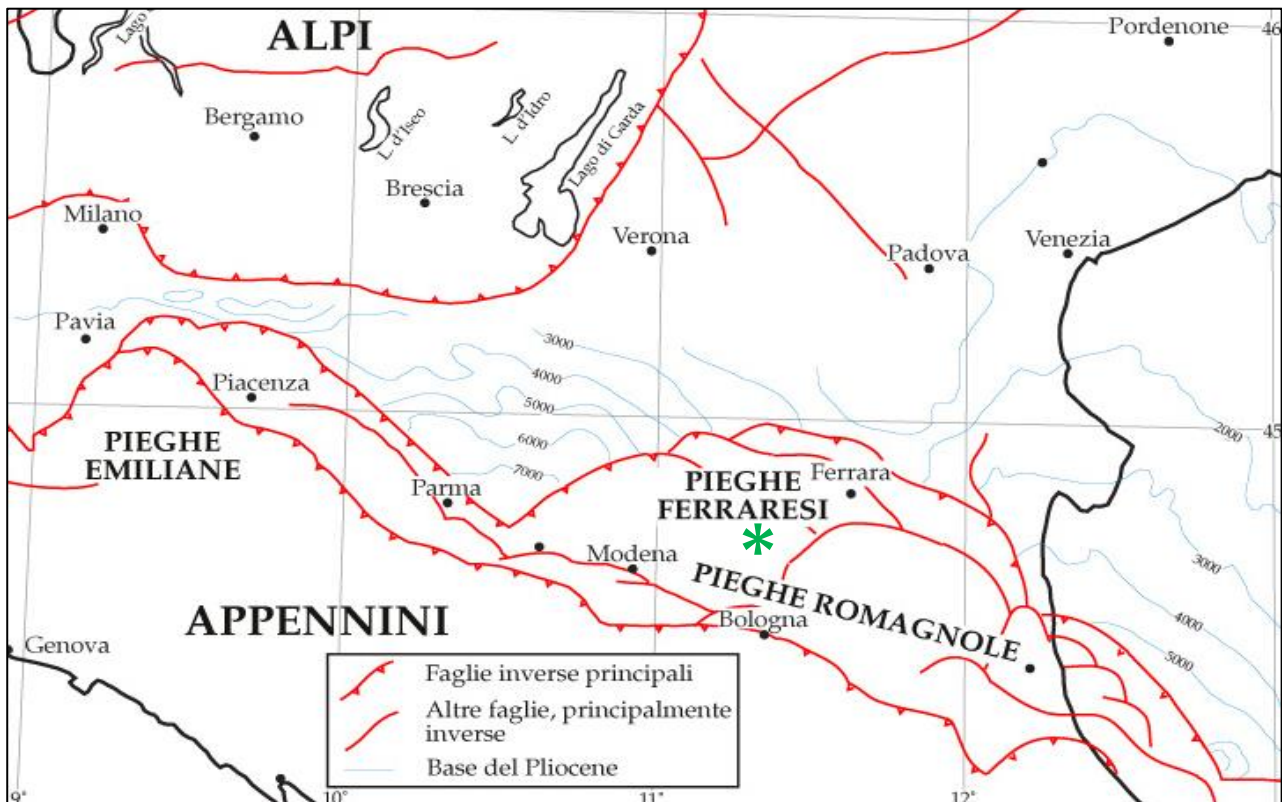


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghie Ferraresi", "Pieghie Romagnole" e "Pieghie Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghie Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, estese tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-4, Figura 3-5), che si spingono a nord del Po tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990) e registrano le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione. La complessa struttura sismogenetica delle Pieghie Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale - Pieve di Cento. Verso sud, questa struttura è limitata da una fascia di pieghie e sovrascorrimenti sepolti lungo la direzione Minerbio-San Giorgio di Piano, più prossima al margine appenninico. Nel settore occidentale delle Pieghie Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghie sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale (Figura 3-6).

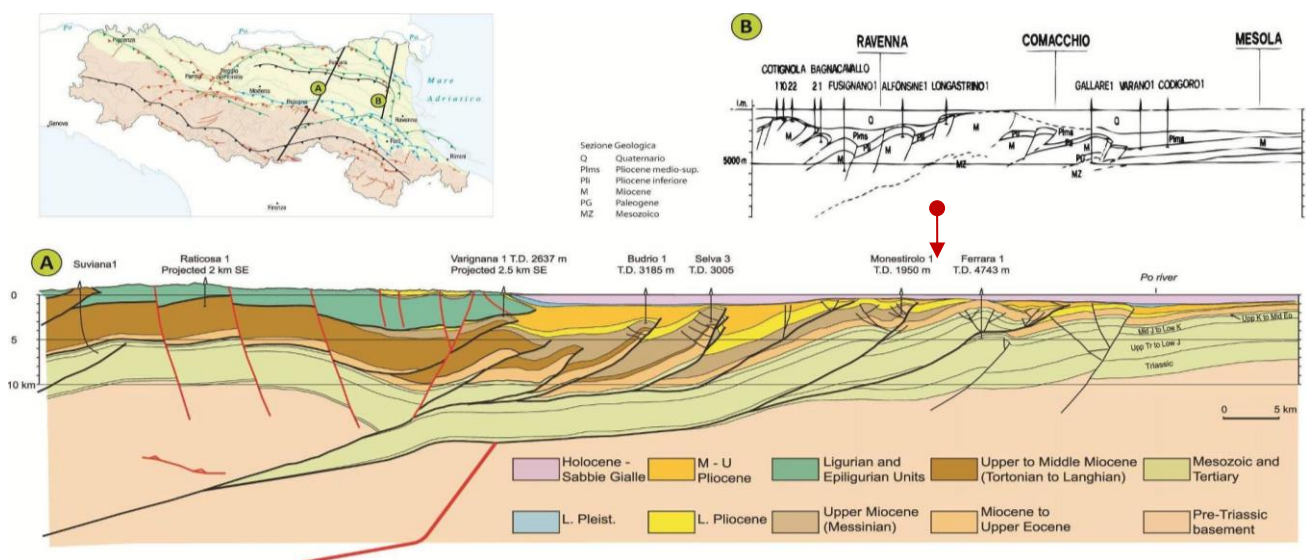


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore (A) è presa da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza delle frecce rosse, attraversa varie fasce strutturali di pieghie e faglie, come ben visibile dalla sezione geologica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

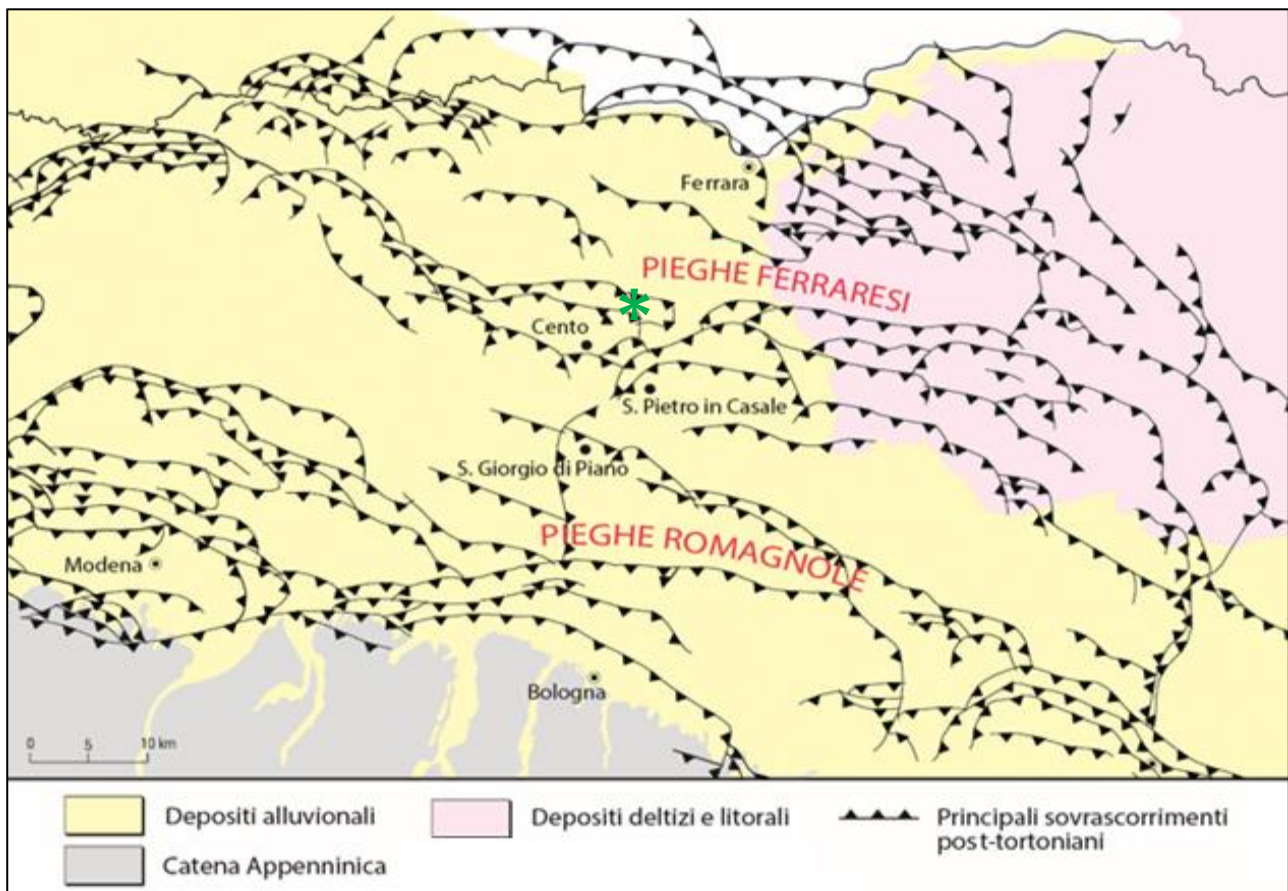


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Fogo CARG 203, Poggio Renatico. L'area analizzata si sviluppa nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

La Figura 3-5 illustra due profili attraverso le Pieghe Ferraresi. La sezione A è tratta da Toscani *et al.* (2009), mentre la sezione B, localizzata alcuni km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento (thrust) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (splay) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti multipli a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde. Nella porzione centrale, la struttura di Ferrara presenta un secondo gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni.

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di piggy-back (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-5). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle grandi variazioni laterali di spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale (Stefani *et al.* 2018). Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350-450.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998) e limitato al tetto da una superficie topografica, mostra spessori che variano da meno di 70 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Casaglia, ad anche oltre 400 m nelle porzioni di sinclinale più depresse. Queste grandi variazioni di spessore registrano quindi altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

Il territorio del Comune di Sant'Agostino si sviluppa con direzione prevalente sudovest - nordest con un allungamento perpendicolare all'asse delle strutture tettoniche sepolte. Data questa configurazione, esso si sovrappone a diverse fasce strutturali di pieghe e faglie. Schematicamente, il territorio può essere suddiviso in due aree strutturalmente omogenee con caratteri stratigrafici ben distinti.

Un alto strutturale è sviluppato nella porzione meridionale del territorio, in corrispondenza dell'abitato di Dosso e della sua area industriale. L'alto è interessato da diverse faglie inverse, sovrascorrimenti e retroscorrimenti ed è limitato a nord da una ampia piega sinclinale che si sviluppa verso Mirabello. Tali strutture sono ben visibili nei profili di sismica a riflessione prodotti negli anni '50 dalla Società Petrolifera Italiana (ora ENI-AGIP) e nelle diverse interpretazioni geologiche degli stessi, proposte in letteratura (es. Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Corrado *et al.*, 2010; Pieri e Groppi, 1981; Toscani *et al.*, 2009).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

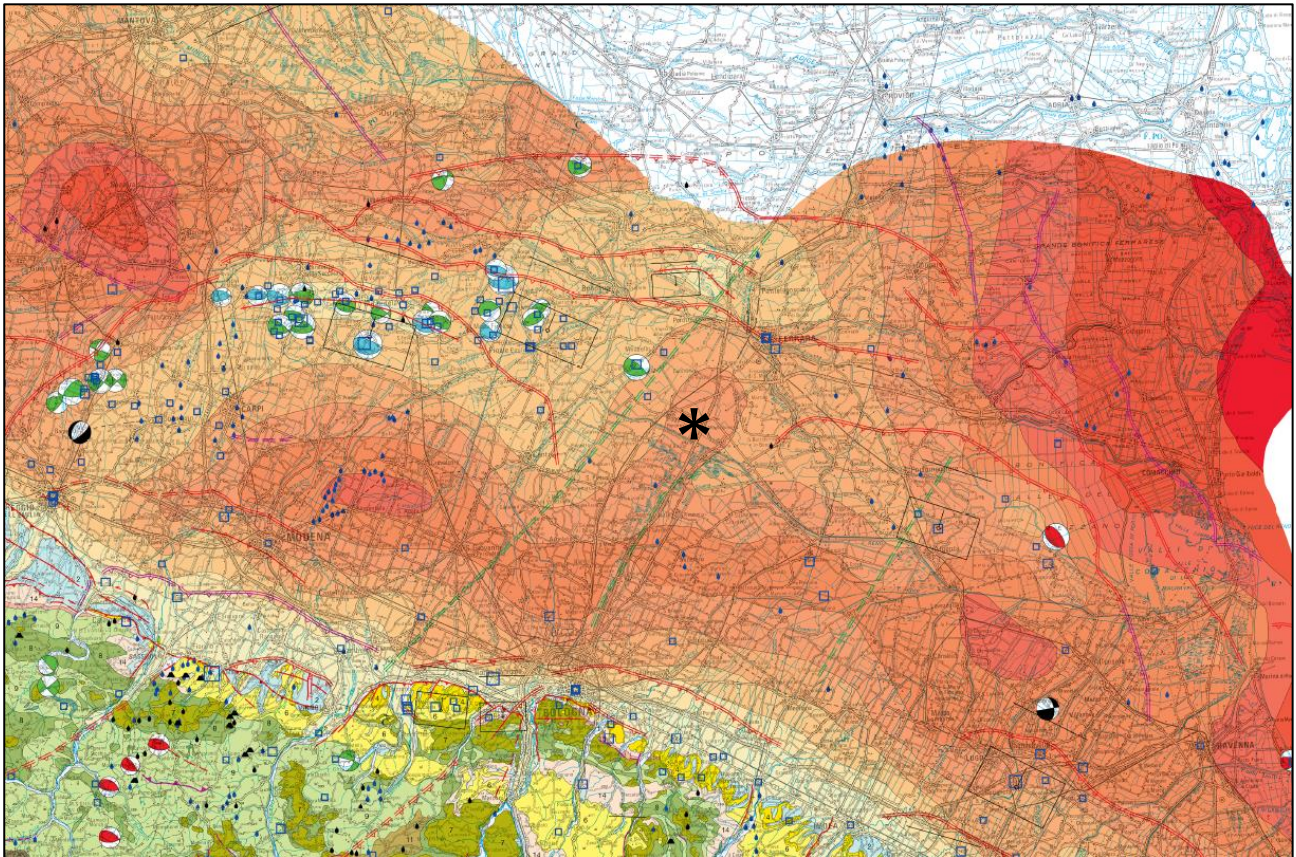


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

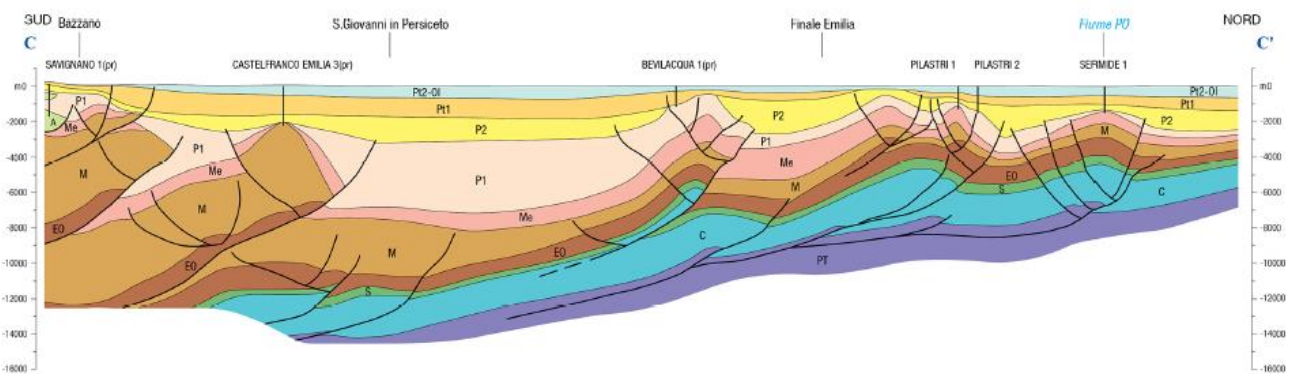


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

4 Dati geognostici e geofisici

I dati utilizzati in questo studio sono stati ricavati da indagini sia di tipo diretto quanto di tipo indiretto. Per quanto concerne i metodi di analisi diretta del sottosuolo sono state esaminate le stratigrafie provenienti sia da sondaggi a carotaggio continuo, sia da sondaggi a distruzione di nucleo, che seppur meno dettagliate delle prime, offrono informazioni relative allo spessore e alla tipologia dei corpi sepolti a maggiori profondità, e talvolta anche in relazione alle tipologia e profondità del substrato.

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati i log parametrici di prove penetrometriche statiche (CPT), con punta elettrica (CPTe), piezocono (CPTU e SCPTU) e dilatometri Marchetti (DMT). Sono stati inoltre esaminati i rapporti di prova di indagini geofisiche tipo Down-Hole (DH, SCPT, SDMT), Cross-Hole (CR), HVSR e MASW. Infine sono state raccolte prove di laboratorio di colonna risonante (CR), utilizzate per la caratterizzazione dinamica di alcuni terreni ai fini della risposta sismica locale.

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini - scala 1:10.000 (Tavola 1) descritta al paragrafo 8.1.

4.1 Indagini di repertorio

Nella prima fase dello studio di microzonazione sismica si è provveduto al reperimento delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili sul territorio comunale. Questa attività ha portato all'acquisizione della banca dati geognostica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, oltre che alla raccolta dei dati di sottosuolo disponibili presso l'archivio comunale, con particolare riguardo a quelli derivanti dalle indagini realizzate dopo il sisma del 2012.

Nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 982 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati i dati di sottosuolo dei Comuni confinanti. Ciò ha permesso di aumentare le conoscenze geologiche e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche	CPT	407
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTe	15
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	214
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	72

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Prove penetrometriche dinamiche medie	DN	4
Prove dilatometriche	DMT	6
Prove dilatometriche sismiche	SDMT	4
Sondaggi a carotaggio continuo	S	96
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	1
Sondaggi a distruzione di nucleo	SD	8
Pozzi per acqua	PA	14
Prove di colonna risonante	CR	2
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	87
Prova sismica in foro tipo Down-Hole	DH	2
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	19
Prova sismica in foro tipo Cross-Hole	CH	1
	TOTALE	952

Tabella 4-1 - Numero di indagini pregresse raccolte ed utilizzate per lo studio, suddivise per tipologia.

Le indagini ritenute affidabili sono state raccolte, organizzate ed archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche indicate dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.) per gli studi di microzonazione sismica. Un archivio informatizzato consente di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo disponibile, al fine di renderlo più facilmente consultabile, fruibile ed aggiornabile. La struttura della banca dati consente, inoltre, di associare al dato geografico (sito d'indagine) degli attributi alfanumerici relativi alle diverse prove realizzate come, ad esempio, profondità indagata, livello della falda, spessore degli orizzonti rilevati, ed altro. Oltre a ciò, ad ogni prova archiviata è possibile associare i propri parametri tecnici come, ad esempio, colpi di avanzamento, valori di Vs misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione dei dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 4.0.1 – messo a disposizione dal D.P.C.– che, attraverso maschere dedicate, consente l'inserimento dei dati all'interno di tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino è stato necessario realizzare una specifica campagna di acquisizioni di microtremore sismico di lunga durata, con lo scopo di verificare la

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

presenza di amplificazioni alle basse frequenze come indicato in alcuni lavori pubblicati su riviste scientifiche internazionali (es. Mascandola *et. al.* 2019, Mascandola *et. al.* 2017, Milana *et al.* 2014). L'abbondanza e l'omogenea distribuzione delle indagini geognostiche pregresse, ha invece consentito una chiara ed accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico ed una buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo.

Allo stesso modo la buona disponibilità di prove geofisiche, come SCPT e MASW, ha permesso di definire le variazioni di V_{s30} alla scala dell'intero territorio indagato, senza necessità di eseguire nuove indagini.

4.2.1 Indagini realizzate in situ

4.2.1.1 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con sismografo e sono state finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed alle analisi HVSr del sottosuolo (Albarellò 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, considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente diffusamente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ($10-15 \text{ m/sec}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione di tipo "passivo".

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSr - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori derivanti da onde di superficie (onde di *Rayleigh*) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

A supporto dello studio di microzonazione sono state effettuate 20 registrazioni di microtremore sismico di lunga durata. Le misure sono state eseguite mediante sismografo "SARA" modello SL06 equipaggiato con sensore velocimetrico a tre componenti da 2.0 Hz. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 100 Hz, con un tempo di singola registrazione variabile tra 50 e 240 minuti.

I punti di misura sono stati georiferiti tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m, mentre le singole ubicazione sono state scelte considerando la distribuzione di indagini disponibili di analoga tipologia. Alcune registrazioni sono state scartate, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione. Tra le registrazioni effettuate ne sono state quindi selezionate 9 (Tabella 4-2) particolarmente affidabili ed accurate che sono state inserite in banca dati ed utilizzate per la microzonazione sismica.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	DATA	DURATA	f ₀	A ₀
HVSR1ter	038021P837HVSR916	44,7650	11,3313	26/11/2018	82 min	0,30	3,45
HVSR2bis	038021P838HVSR917	44,7670	11,3354	26/05/2018	235 min	0,35	4,37
HVSR3bis	038021P839HVSR918	44,7726	11,3402	26/05/2018	210 min	0,32	3,81
HVSR7	038021P840HVSR919	44,7864	11,3696	27/05/2018	240 min	0,61	3,70
HVSR11bis	038021P841HVSR920	44,7981	11,3922	26/11/2018	72 min	0,77	2,70
HVSR12	038021P842HVSR921	44,8024	11,4011	21/05/2018	54 min	0,26	3,70
HVSR12bis	038021P843HVSR922	44,8029	11,4036	26/11/2018	180 min	0,27	2,68
HVSR13	038021P844HVSR923	44,8036	11,4080	17/05/2018	120 min	0,23	3,00
HVSR14bis	038021P845HVSR924	44,8060	11,4145	26/11/2018	180 min	0,24	3,00

f₀ = Frequenza naturale

A₀ = Ampiezza del picco di f₀

Tabella 4-2 - Principali dati associati alle 9 misure di microtremore a stazione singola HVSR di nuova esecuzione.

5 Modello del sottosuolo

Una fase fondamentale per l'elaborazione della microzonazione sismica è stata l'individuazione del substrato sismico, caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito in normativa dal valore di velocità delle onde seconde superiore agli 800 m/s.

Dato che una determinata distribuzione dell'amplificazione spettrale alle varie frequenze oscillatorie è compatibile con molte diverse combinazioni di spessori e velocità sismiche dei diversi corpi, per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità del sottosuolo occorre disporre una calibrazione del

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

sottosuolo derivante da fonti indipendenti, come sondaggi e profili sismici. Il “basamento sismico” è qui sepolto a notevoli profondità, raggiunte solo da un ridotto numero di pozzi, effettuati in passato per la ricerca di idrocarburi. A questi livelli del sottosuolo, non sono disponibili misure dirette in pozzo delle velocità sismiche, per cui si è dovuto fare ricorso a metodi indiretti, basati sullo studio dei microtremori, interpretati nel contesto geologico regionale, derivato dall'interpretazione di numerose linee sismiche, effettuate in gran parte dall'AGIP, e dai dati stratigrafici acquisiti durante le perforazioni profonde.

Le velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità, non però in modo lineare, dato che esse subiscono brusche accelerazione attraverso varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti sono stati utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale. I principali contrasti di impedenza, associati a tali limiti, sono stati identificati mediante misure di microtremore sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione alle diverse frequenze vibrazionali del rapporto tra le componenti oscillatorie orizzontali e verticali (H/V o HVSR).

L'analisi di questi dati, associata alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso l'individuazione della superficie che genera il principale contrasto di impedenza rilevabile con la tecnica HVSR. La superficie è associata ad un aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s), individuata al tetto di successioni torbiditiche del Pliocene. Queste areniti si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione. Esse sono limitate al tetto da una superficie netta, associata a una discordanza angolare. A questa superficie si sovrappongono sedimenti quaternari, inferiormente marini e superiormente continentali, caratterizzati da velocità di propagazione delle onde sismiche marcatamente più basse di quelle del substrato. I dati rilevati all'interno di successioni quaternarie mediante tecniche di *Down-Hole* profondo (Minarelli *et al.* 2016) nel territorio indagato, mostrano come fra i 200 e i 300 m di profondità le V_s siano ancora basse, con valori minori di 400 m/s, non compatibili con quelli caratteristici del substrato sismico. Tale livello di riferimento deve essere quindi generalmente individuato a profondità più elevate, e corrisponde un picco di risonanza a più bassa frequenza, correlabile con il tetto dei depositi pliocenici, che possono essere assunti come bedrock sismico dell'area di studio. Questa superficie è però stata ampiamente piegata dalla deformazione tettonica, per cui si trova oggi a profondità notevolmente variabile. Essa è relativamente prossima alla superficie nella fascia di anticlinale, nella parte meridionale del territorio comunale, mentre si trova sepolta a maggiori profondità in quella settentrionale. Questa superficie corrisponde sempre al tetto dei corpi di areniti torbiditiche del Pliocene, ma è associata ad una variabile lacuna temporale. La superficie si sovrappone infatti a torbiditi di età variabile, più antiche nelle

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

aree di culminazione anticlinale, più recenti muovendosi verso le aree di sinclinale. Anche l'età della base dei successivi depositi quaternari è variabile. La combinazione di questi due fattori fa sì che la lacuna temporale associata alla discordanza che marca il tetto del substrato sismico sia più lunga nelle zone di alto strutturale e tenda a diminuire verso le adiacenti aree di sinclinale.

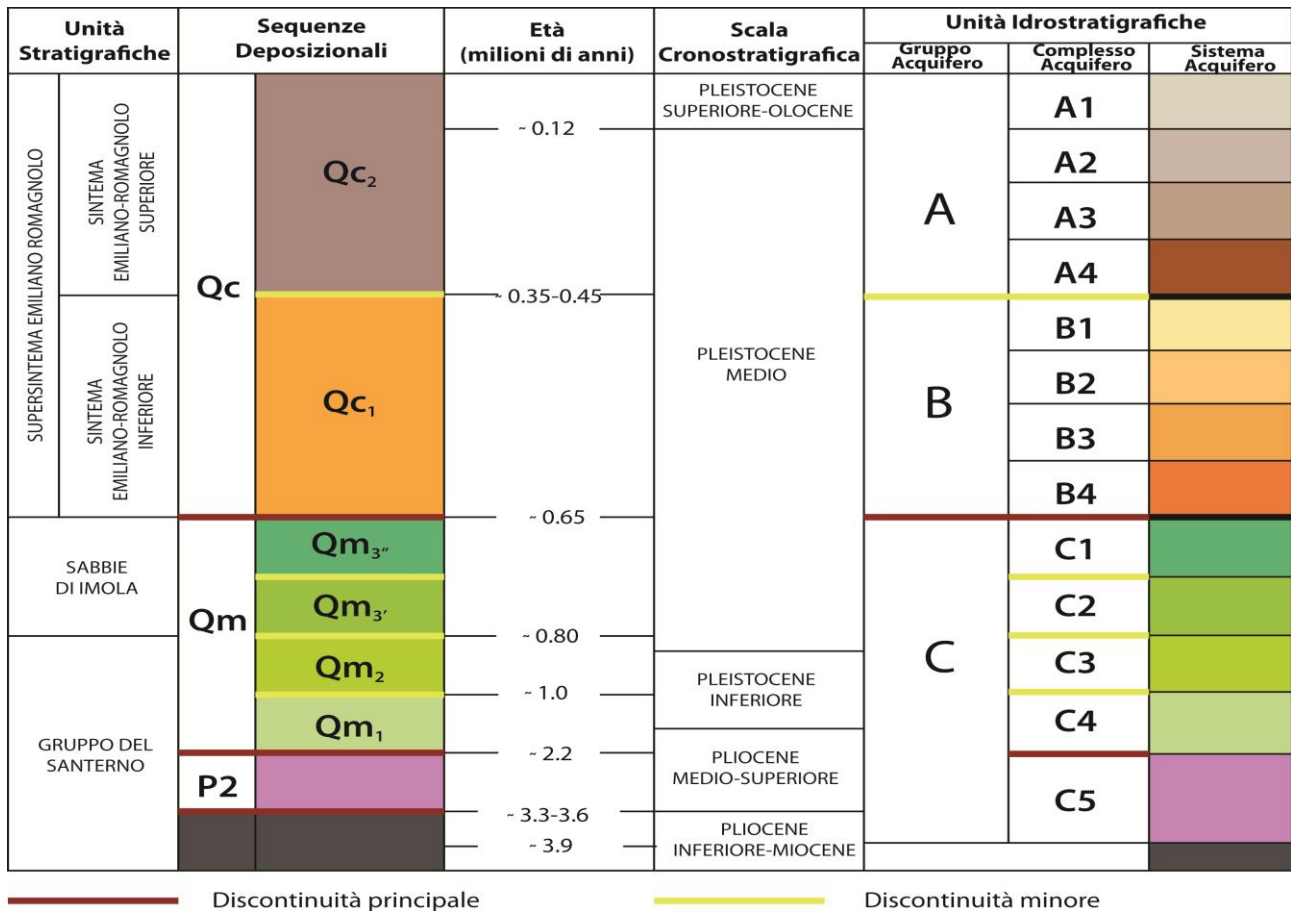


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.1 Substrato

Ai fini della microzonazione sismica, con il termine "substrato" sono qui definite tutte le unità stratigrafiche sottostanti il Quaternario Marino (QM).

Come precedentemente accennato, il substrato è qui limitato da una superficie di discordanza, che marca il tetto di torbiditi plioceniche. Sopra gli spessi depositi prevalentemente carbonatici del Mesozoico e del Paleogene, poggiano le potenti successioni del Neogene, in gran parte terrigene. Queste ultime sono qui costituite per buona parte del Miocene da fanghi deposti in ambienti marini profondi, anche anossici, ricoperti da potenti unità torbiditiche del Miocene superiore e del Pliocene, deposte nel bacino d'avanfossa

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

appenninica. Queste correnti di torbida erano generalmente alimentate da sabbie di origine alpina e provenienza occidentale. Lo spessore di queste unità supera spesso abbondantemente il chilometro. Durante la deposizione della Formazione Marnoso-Arenacea dell'Appennino, continuata fino al Tortonian, la zona esaminata era ancora dominata dalla sedimentazione di fanghi argillosi di ambiente marino profondo. Durante le fasi pre-evaporitiche e sin-evaporitiche del Messiniano, in buona parte dell'area considerata, si depositavano spessi corpi sabbiosi di conoide torbiditica, con alimentazione dall'area lombarda, ascritti alla Formazione di Bagnolo, secondo la terminologia ENI-AGIP (Ghielmi *et al.*, 2010).

Nell'area corrispondente alla parte settentrionale del territorio comunale, si depositavano invece sedimenti argillosi di rampa e scarpata, progressivamente ricoperti dai sedimenti torbiditici. Il Messiniano post-evaporitico è inizialmente caratterizzato da un'ulteriore migrazione verso nord della sedimentazione torbidica, mentre nelle aree più settentrionali si depositavano fanghi di ambiente anossico, arricchiti in carbonio organico, con qualche intercalazione carbonatica. In quasi tutta l'area analizzata, la parte finale del Messiniano è formata da unità torbiditiche ricche di sabbia e contenenti talvolta anche conglomerati, attribuite alla Formazione di Fusignano. Il Pliocene è inferiormente formato ancora da potenti corpi di torbiditi molto arenacei, ascritti alla Formazione di Canopo, che formano il più compatto corpo arenaceo, con intercalazioni di ghiaie e conglomerati, sviluppati particolarmente nella parte meridionale del territorio considerato.

Dopo la deposizione di questa formazione, le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella propagazione verso l'avampaese della deformazione tettonica compressiva. Nell'area indagata, durante il Pliocene, si è infatti sviluppato il fascio di sovrascorrimenti e anticlinali di rampa che dall'area di Mirandola prosegue verso sud-est, verso Argenta e Ravenna. Questa deformazione sin-sedimentaria ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali ed indotto superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione od erosione, sia sottomarina che subaerea (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella di Dosso-Corporeno sviluppata nella parte meridionale dell'area comunale indagata, o quella di Bondeno-Casaglia sviluppata più a nord. Fra questi due fasci anticlinali complessi si sviluppa la sinclinale di Mirabello. Lo sviluppo dell'anticlinale di Dosso-Corporeno suddivise il bacino torbiditico in due parti diseguali, una meridionale più vasta, corrispondente alla sinclinale di Sala Bolognese ed una settentrionale, corrispondente alla sinclinale di Mirabello. In queste aree di sinclinale continuavano ad accumularsi le successioni di sabbie torbiditiche, con spessori anche superiori ai 1.500 m, ascrivibili alle Formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Nelle due aree di sinclinale, queste successioni non presentano discordanze stratigrafiche marcate o prolungate lacune, al contrario di quanto avviene in

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

corrispondenza delle aree di anticlinale. Al contempo, sul fascio anticlinale interposto alle sinclinali si sviluppavano successioni fangose relativamente condensate e lacune stratigrafiche come suggerito dall'analisi dei profili sismici.

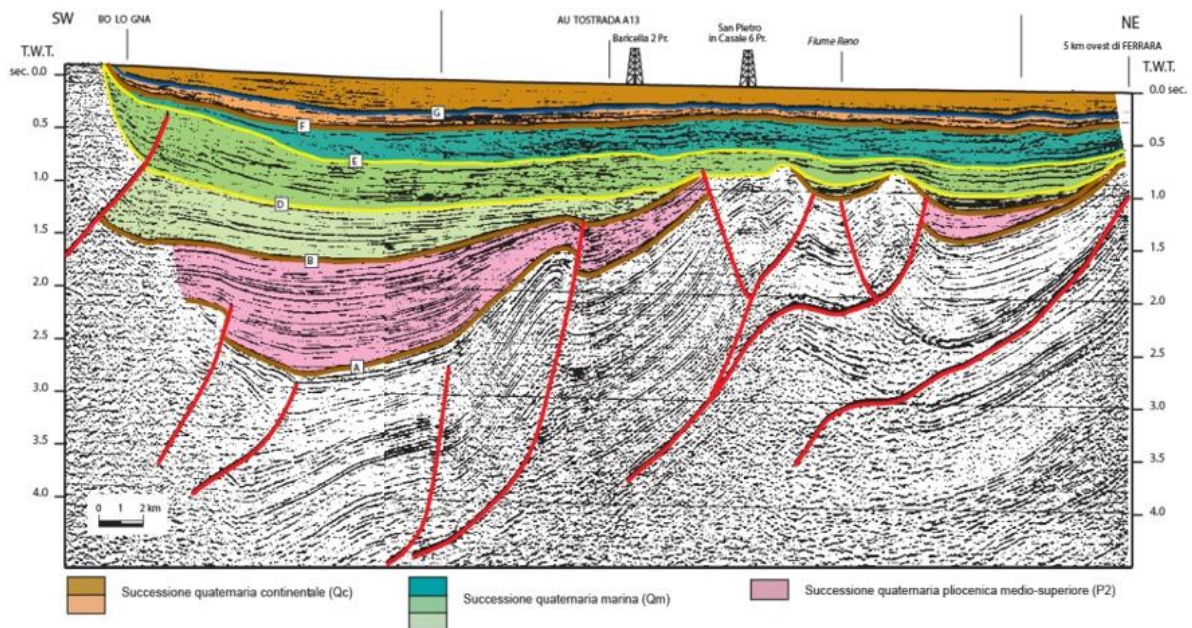


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

Al limite Plio-Pleistocene, si sviluppò una discontinuità stratigrafica anche nell'area di sinclinale settentrionale, verso Mirabello. Questa discordanza fu associata ad un netto cambio litologico e di facies deposizionali, indotto dalle modifiche paleogeografiche causate da una fase di importante riorganizzazione strutturale. In questa area, la sedimentazione torbidity della Formazione di Porto Garibaldi fu infatti interrotta, al limite delle sequenze deposizionali PL3 e PL4 (Ghielmi *et al.*, 2010) (P2 in schema di Figura 5-1), a causa dall'innalzamento del fondo marino. Questo innalzamento, nei pressi di Concordia sulla Secchia, ha determinato una "barriera sottomarina" che bloccava l'espansione delle correnti di torbida. Il rapido innalzamento tettonico fu causato dallo sviluppo di anticlinali di rampa transpressiva sinistra. Nell'area di sinclinale settentrionale, i corpi torbidity sono quindi limitati superiormente da una superficie netta, a cui seguono centinaia di metri di argille poco litificate, ascrivibili alla Formazione di Ravenna, di età quaternaria. Il deciso cambio litologico, di facies e di provenienza sedimentaria crea un netto contrasto di impedenza acustica associato ad un marcato aumento delle velocità sismiche, anche nella porzione settentrionale del territorio indagato.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Durante la fase iniziale del Quaternario, nella parte meridionale del territorio comunale corrispondente all'alto strutturale di Dosso, continuava invece a svilupparsi una lacuna stratigrafica. La netta discordanza tronca i depositi torbiditici della Formazione di Canopo ed è associata alla lacuna di una significativa parte del Pliocene. La sedimentazione riprese diffusamente attraverso tutta la zona di alto strutturale solo durante in una fase successiva del Quaternario, con la deposizione di argille di mare aperto su cui progredano sabbie deltizie di Po. Nella sinclinale corrispondente alla porzione settentrionale del territorio comunale, la superficie di discordanza si sovrappone alle torbiditi plioceniche della Formazione di Porto Garibaldi, più recenti di quelle della Formazione del Canopo. Dall'interpretazione dei profili sismici disponibili (Figura 5-2), la superficie appare netta, ma non sembra associata a significative lacune e discordanze angolari. Alla superficie si sovrappongono depositi argillosi relativamente condensati facenti parte dei terreni di copertura.

5.2 Terreni di copertura

Come già in precedenza accennato la successione quaternaria è formata da sedimenti assai poco litificati e consolidati, che sono attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche ed alla posizione stratigrafica, ai "terreni di copertura". Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche descritte di seguito.

5.2.1 Quaternario Marino

Le successioni del Quaternario inferiore sono inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino e sono formate da argille a foraminiferi platonici, passanti superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte delizio. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario. Questa unità, nella pianura ferrarese e bolognese, è raggiunta solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato, generalmente realizzati per fini di ricerca di idrocarburi.

Nell'area considerata l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m nella zona di sinclinale settentrionale e spessori assai più ridotti nella zona di alto strutturale meridionale, meno subsidente. Nel sottosuolo studiato questi sedimenti sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo recente Subsistema. Facies deposizionali analoghe sono studiabili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, in aree ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva tardo-quaternaria. Questi sedimenti argillosi

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano, mentre sono oggi inquadrati nelle unità litostratigrafiche affioranti della Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Ricci Lucchi *et al.*, 1982).

Nell'area in esame i depositi deltizi si sovrappongono, in condizioni di relativa continuità, ai fanghi di mare più aperto e profondo. A sud dell'area considerata, verso Sala Bolognese, questi semidementi deltizi sono dominati dagli apporti del Fiume Reno, mentre nell'area qui considerata i depositi deltizi sembrano riflettere largamente un apporto da parte del Fiume Po.

Il Quaternario Marino è frequentemente limitato al tetto da una discordanza stratigrafica, anche angolare nella parte meridionale del territorio indagato, associata ad una lacuna cronologica, che lateralmente passa in condizioni di paraconcordanza. La discordanza è legata alla fase di riorganizzazione strutturale datata a circa 650.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.2.2 Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo)

La discordanza sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da subordinati livelli marini, costieri o salmastri, particolarmente sviluppati nelle aree di sinclinale presenti nella parte più settentrionale del territorio comunale qui analizzato. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine e deltizie alle attuali condizioni francamente continentali. Nell'area indagata, questo Supersistema si accumulava nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po.

Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani. Tutte i sedimenti affioranti o presenti nelle prime decine di metri di sottosuolo sono infatti riferibili ai sedimenti del Fiume Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini. Questa alternanza è stata fortemente influenzata dal susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle delle fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui presenti solo nella parte bassa del Supersistema.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghie Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

La discordanza corrisponde, in questa area, alla definitiva scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini.

5.2.3 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, che mostrano ciascuno uno spessore di circa 30-40 metri, in corrispondenza delle aree di sinclinale, mentre spessori minori di circa 20-30 metri, sono tipici delle aree di alto strutturale. L'evoluzione deposizionale testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario di avanfossa, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e del reticolo fluviale padano, legato al prevalere degli apporti terrigeni rispetto alla creazione di spazio di accomodamento sedimentario.

Lo sviluppo di questi cicli sedimentari è stato controllato dalle grandi fluttuazione glacio-eustatiche, che hanno influenzato sia il clima dei bacini idrografici padano-appenninici, sia il livello marino. Il limite inferiore dei cicli è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale. La porzione trasgressiva basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera. Le porzioni regressive sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana alluvionale, con subordinati corpi nastriformi isolati di sabbie di canale fluviale. Nella parte superiore dei cicli, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi continui, lateralmente estesi in tutto il sottosuolo della pianura ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati depositi in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi di stazionamento basso singlaciale del livello del mare.

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana. I cicli più antichi registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra rispetto a quelli più recenti. I tre Sintemi superiori (AES₆, AES₇, AES₈), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ogni Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette a forti apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è qui registrata dallo sviluppo di depositi palustri dulcicoli di pianura costiera, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è invece caratterizzata da sabbie di canale fluviale intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea.

La parte superiore dei Subsistema AES₆ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale di Po che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali. La parte superiore dei Subsistema AES₇ è invece costituita da depositi generalmente più fini di Reno associati a corpi di sabbie fluviali più discontinui.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo è particolarmente rilevante sia ai fini geotecnici sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone per il contesto geologico in esame la valutazione della velocità delle onde di taglio (Vs) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti del Pleistocene terminale e dell'Olocene. La porzione singlaciale è ascritta al Subsistema di Villa Verucchio (AES₇), mentre la parte più recente è attribuita al Subsistema di Ravenna (AES₈), di cui è affiorante solo l'intervallo di età post-romana, attribuito all'Unità di Modena (AES_{8a}).

Il Subsistema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso deposti in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici maturi, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi corpi di piana interalvea sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, deposti dal Reno e da altri fiumi appenninici.

La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene. La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES_{8a}). Questi sedimenti sono stati deposti in età moderna, in gran parte a partire dal XV secolo dopo Cristo, fino all'interruzione settecentesca della dinamica deposizionale. Sabbie e limi di riempimento di canale di Reno affiorano in corrispondenza del pronunciato dosso morfologico che attraversa il territorio e su cui si sviluppano i centri abitati di Sant'Agostino e San Carlo. Sedimenti analoghi interessando anche l'area golenale dell'attuale corso fluviale del Reno. Lateralmente a questi corpi si affiancano larghe fasce lobate di limi sabbiosi di argine naturale e ventaglio da rotta che sfumano in sedimenti fangosi deposti in aree di depressione interalvea e palude dulcicola,

Una più completa descrizione delle parti affioranti dell'Unità di Modena è fornita nel paragrafo 8.2.2, che analizza in dettaglio la carta geologico-tecnica appositamente redatta per questo studio.

6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte interpretative che hanno guidato lo studio di microzonazione sismica. Saranno quindi evidenziate ragioni ed elementi a supporto delle interpretazioni effettuate, valutando al contempo inevitabili incertezze ad esse connesse ed eventuali criticità rilevate.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

Le misure di rumore ambientale a stazione singola sono fortemente influenzate dal contesto del sito nel quale viene effettuata la registrazione e dalle condizioni meteorologiche.

Tra i fattori ambientali il vento è l'agente atmosferico con maggiore influenza, in grado di indurre perturbazioni a bassa frequenza (< 1 Hz) non legate alle caratteristiche del sito.

I transienti principali sono comunque provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili, la cui influenza dipende dall'energia e dalla distanza. Il traffico urbano di una strada ad elevato scorrimento ad esempio, è una sorgente di onde a grande ampiezza e breve periodo, mentre i disturbi di natura industriale possono generare picchi estremamente ampi, o massimi locali multipli, in alcun modo connessi alle condizioni geologiche del sito.

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante le registrazioni dei microtremitori.

Lo strumento di misura è stato inserito in una piccola buca scavata nel terreno in modo da ridurre al minimo le perturbazioni indotte dal vento sul segnale. La rimozione della parte superficiale del suolo ha permesso anche di migliorare l'accoppiamento tra i sensori velocimetrici ed il terreno, oltre che di verificare l'assenza di interfacce intermedie (es. cemento, fondo stradale, stabilizzato), responsabili di inversioni marcate di velocità in grado di determinare una non corretta interpretazione della curva HVSR.

Viste le incertezze e le problematiche esposte, è stato necessario realizzare ben 20 registrazioni prima di ottenere 9 misure di sismica passiva a stazione singola affidabili. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta spesso accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare diverse misure realizzate.

La nuova serie di registrazioni di microtremore (paragrafo 4.2.1) è stata acquisita lungo la traccia della sezione geologica C-C' (cfr. Martelli *et al.*, 2017) al fine di identificare i principali contrasti di impedenza presenti nella successione stratigrafica e stimare la profondità del substrato sismico (paragrafo 5.1).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

La maggior parte delle acquisizioni hanno avuto durata media di 180 minuti, e sono state analizzate con finestre variabili da 60 a 180 s. Alcune di esse sono state effettuate in notturna per limitare al massimo l'effetto di transienti legati al traffico veicolare ed attività antropiche in genere.

Queste misure di lunga durata hanno permesso di individuare picchi a bassa frequenza, compresi tra 0,2 e 0,4 Hz, la cui presenza è avvalorata da lavori pubblicati su riviste scientifiche internazionali (e.g. es. Mascandola *et al.*, 2019; Mascandola *et al.*, 2017; Milana *et al.*, 2014).

Questi picchi a bassa frequenza non sono però generalmente osservati nelle misure HVSR pregresse disponibili per il territorio comunale. L'assenza di tali evidenze è in gran parte legata alle caratteristiche della strumentazione, ai tempi di acquisizione delle registrazioni e all'approccio di elaborazione. Gran parte delle misure pregresse sono state infatti realizzare con strumentazione poco sensibile alle basse frequenze, dotata di sensori a 4,5 Hz. Altri fattori che compromettono la "visibilità" dei picchi a bassa frequenza sono certamente legati ai tempi di acquisizione, in genere non superiori a 30 minuti, e ad elaborazioni eseguite utilizzando finestre non più lunghe di 30 secondi.

Le nuove misure e le numerose indagini di microtremore pregresse hanno permesso di definire le frequenze caratteristiche nelle diverse aree indagate e redigere una dettagliata carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3, paragrafo 8.3).

Nonostante l'inevitabile disomogeneità e il diverso grado di affidabilità delle numerose misure di rumore sismico ambientale raccolte, è stato comunque possibile identificare in modo sufficientemente chiaro le frequenze di vibrazione caratteristiche del territorio indagato. In tutte le misure è sempre visibile infatti un primo picco generalmente compreso tra 0,60 e 0,85 Hz con ampiezze variabili da 2 e 3. Un secondo picco a frequenze più basse è invece visibile esclusivamente dalle misure di lunga durata. Questo picco, verosimilmente la f_0 , varia tra 0,3 e 0,35 Hz nella fascia meridionale del territorio corrispondente alla frazione di Dosso, per poi abbassarsi a frequenze di 0,25 - 0,2 Hz nelle aree più settentrionali di Sant'Agostino e San Carlo. Anche i valori di ampiezza del picco principale, e quindi l'entità del contrasto di impedenza, diminuiscono procedendo dalle aree meridionali del territorio o quelle settentrionali.

6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (v. Allegato 1) si è tentato di associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute nel sottosuolo a scala regionale. Per convalidare tali attribuzioni sono stati inoltre considerati i dati di alcuni pozzi per idrocarburi presenti in aree limitrofe al territorio di Sant'Agostino e quelli di alcune misure di microtremore realizzate durante la Microzonazione Sismica di Cento (FE). Oltre a ciò sono stati

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

utilizzati i dati di Vs provenienti dall'indagine di down-hole profondo eseguita nell'ambito della Microzonazione di Mirabello (FE).

La Figura 6-1 mostra l'ubicazione di tutte le indagini utilizzate per la definizione del substrato sismico. In Figura 6-2 e Figura 6-3 sono invece schematizzati i risultati ottenuti e le interpretazioni derivanti dalle correlazioni tra dati geofisici e stratigrafici.

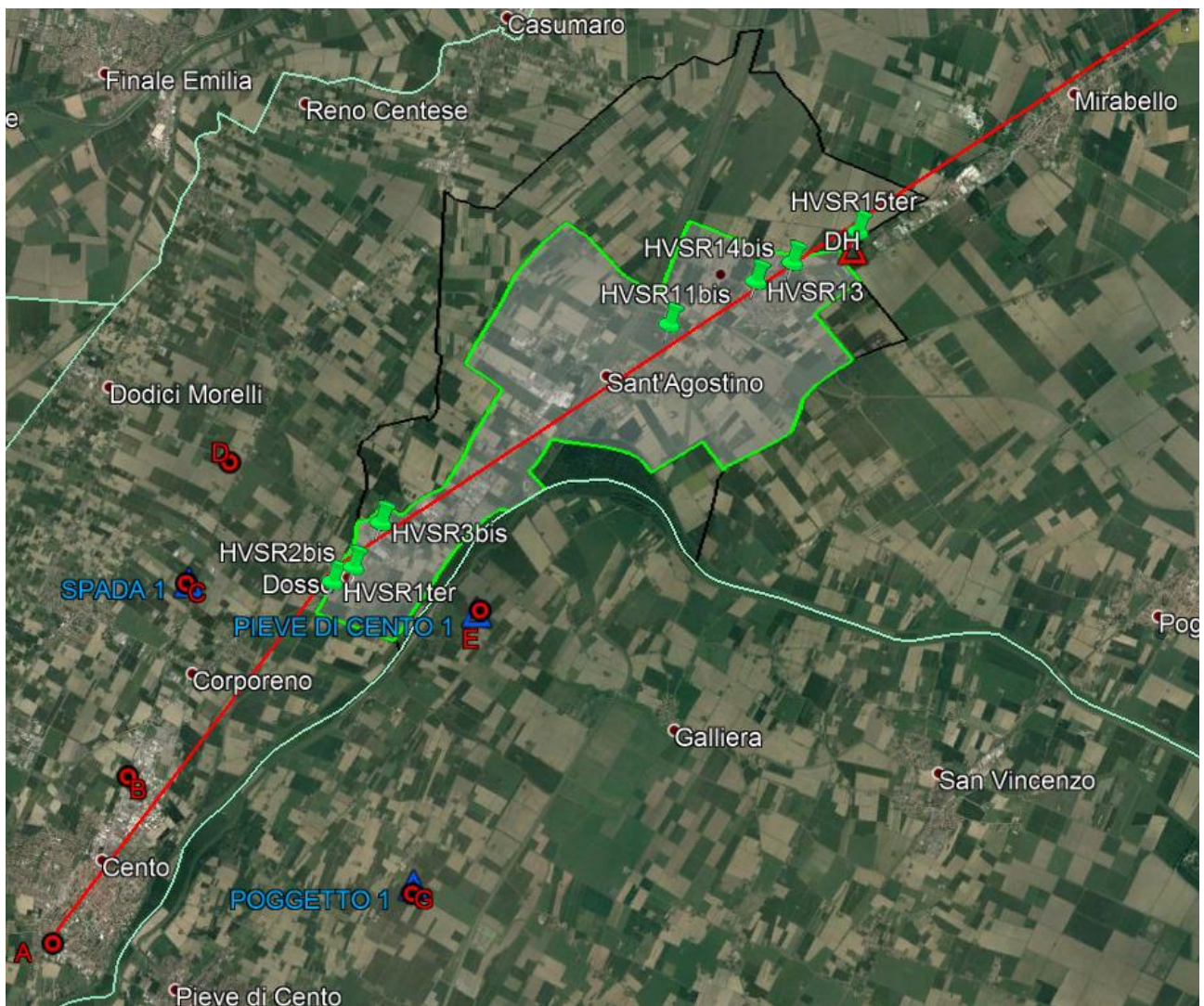


Figura 6-1 – La mappa riporta i principali elementi utilizzati per la definizione del substrato sismico. La linea rossa rappresenta la porzione meridionale della sezione geologica Cento-Occhiobello (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015).

I triangoli blu indicano le ubicazioni dei pozzi per idrocarburi utilizzati per l'individuazione della base della successione quaternaria, mentre quello rosso indica la posizione del down-hole con cui sono stati definiti gli intervalli di Vs delle unità stratigrafiche individuate.

In verde sono invece rappresentate le localizzazioni delle misure HVSr utilizzate a Sant'Agostino per le correlazioni con la stratigrafia profonda, mentre in rosso sono indicate quelle usate nella Microzonazione di Cento (Figura 6-2).

L'area bordata in verde mostra il perimetro degli ambiti di studio della Microzonazione Sismica, mentre in nero è indicato il confine comunale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

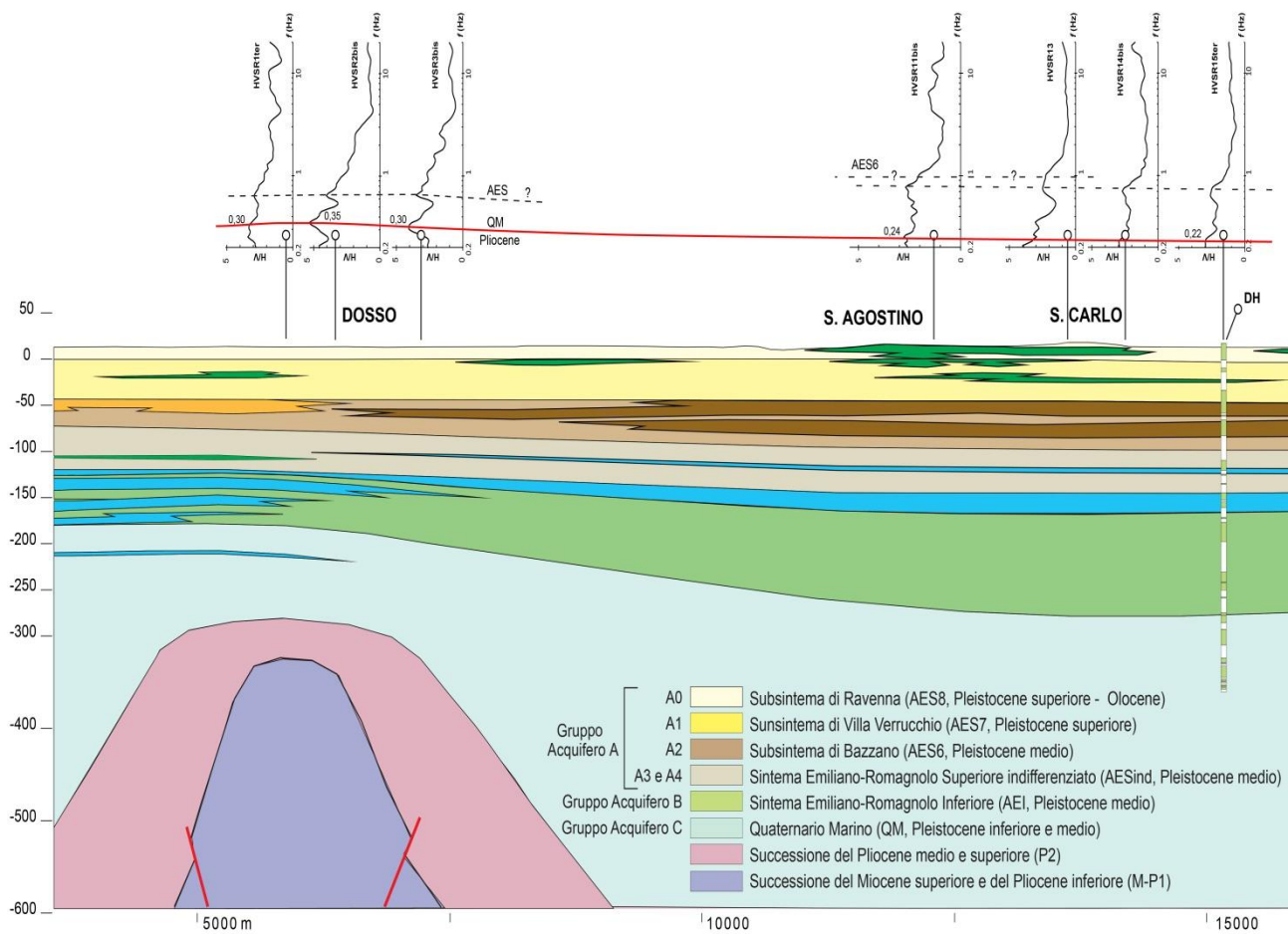


Figura 6-2 – Porzione della sezione geologica Cento-Occhiobello che interessa l'area di Sant'Agostino (Martelli e Romani, 2013; Paolucci et al., 2015 - Allegato 1, sezione C-C'). Sulla sezione sono proiettate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSR di lunga durata eseguite per la Microzonazione di Sant'Agostino (FE). I picchi di H/V sono stati correlati tra loro e associati, utilizzando i valori di V_s ottenuti da down-hole profondo (DH), alle superfici stratigrafiche caratterizzate dai maggiori contrasti di impedenza.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

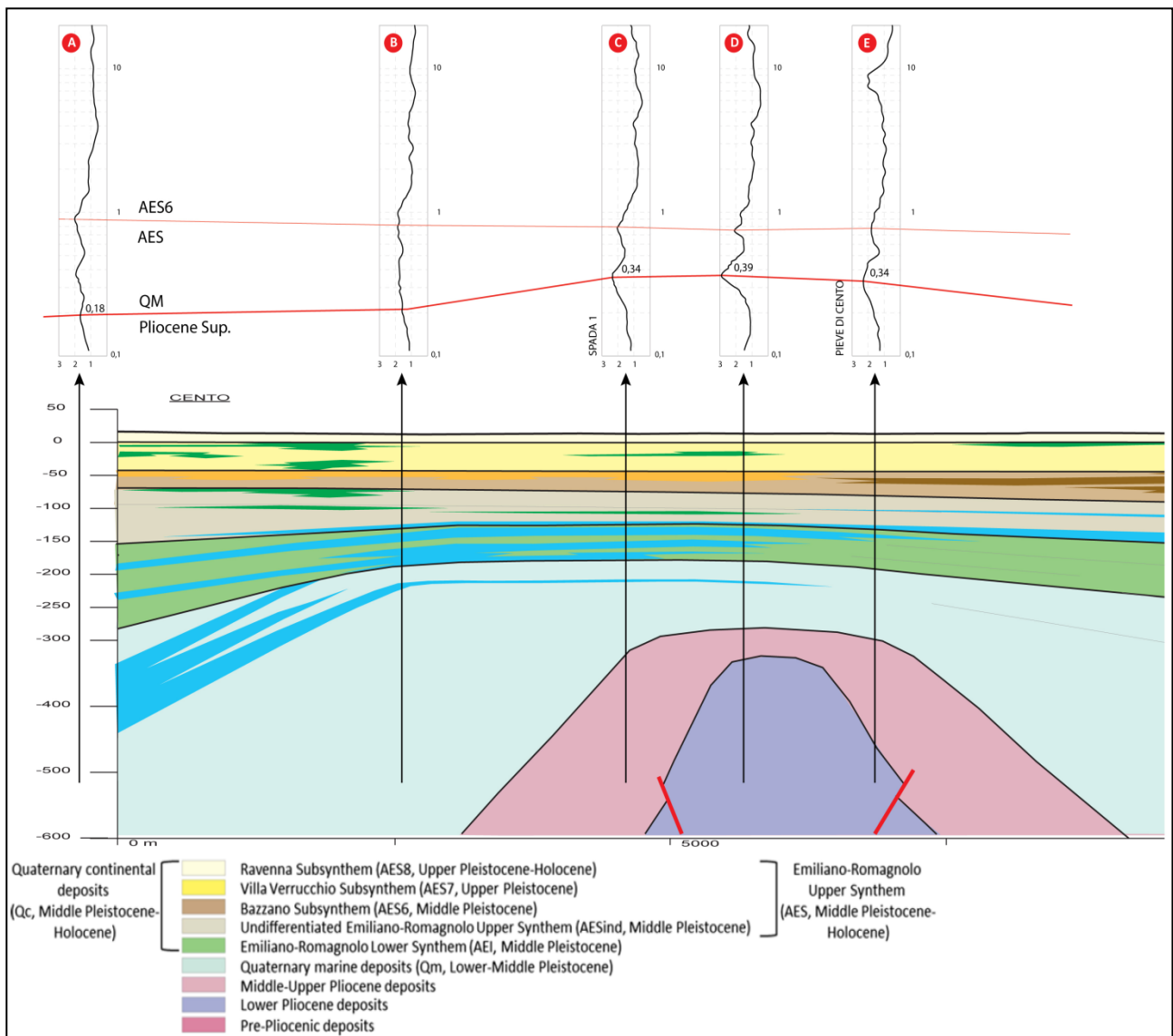


Figura 6-3 - Porzione sud-ovest della sezione geologica Cento-Occhiobello (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015), riportata in nell'Allegato 1 (sezione C-C'), la cui traccia è riportata in carta in Figura 6-1. Sulla sezione sono proiettate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSr realizzate per la Microzonazione di Cento (FE). I picchi di H/V sono stati correlati tra loro e associati a superfici stratigrafiche caratterizzate dai più marcati contrasti di impedenza.

In analogia con quanto effettuato in altri studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (es. Comuni di Mirabello, Sala Bolognese, Cento), e come visibile in Figura 6-2 e Figura 6-3, i picchi a più alta frequenza (0,72 - 0,85 Hz) possono essere correlati con la base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1) che corrisponde alla base del Subsintema di Bazzano (AES₆) (Figura 5-1), datata 230.000-250.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Frequenze inferiori, intorno a 0.6 Hz, possono invece essere messe in relazione ad un contrasto più profondo che corrisponde alla discontinuità che separa il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) da quello Inferiore (AEI). Nella parte più meridionale del territorio indagato, in corrispondenza dell'anticlinale sepolta di Dosso, quest'ultima correlazione appare più incerta a causa della mancanza di dati diretti sulle velocità delle onde di taglio in una successione alluvionale che appare più condensata e lacunosa di quella presente a San Carlo e Mirabello.

L'andamento e la posizione stratigrafica delle principali superfici di discontinuità si evince dalle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1 e Figura 6-3 e Figura 6-3), mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici.

Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili, la profondità della base del Subsintema di Bazzano (AES₆) varia tra i 70 e i 90 m, mentre quella del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) tra 130 e 170 m. Le profondità di dette superfici e le frequenze misurate risultano in sostanziale accordo con la relazione che lega le frequenze fondamentali desunte da analisi di sismica passiva, con i valori di velocità delle onde di taglio disponibili in bibliografia e le profondità dei suddetti contrasti di impedenza.

Come anticipato al capitolo 5, la base del Subsintema di Bazzano (AES₆) e quella del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) non possono, però, essere considerate come *bedrock sismico*. Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, infatti, come le unità stratigrafiche del Quaternario Superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di Vs in media inferiori ai 400 m/s. Tali valori non sono chiaramente compatibili con quelli caratteristici di un "*bedrock sismico*" di riferimento per le analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associato a frequenze di picco più basse.

Le acquisizioni di microtremore sismico di lunga durata eseguite per la microzonazione sismica, mostrano sempre un secondo picco a frequenze molto inferiori, variabili tra 0,2 e 0,35 Hz (Figura 6-3). Lo stesso accade in diverse misure di microtremore di lunga durata eseguite nel Comune di Cento (Figura 6-3), che mostrano un secondo picco, in genere meno marcato, a frequenze variabili tra 0,18 e 0,40 Hz.

In base ai dati stratigrafici disponibili ed ai valori di Vs profondi per analoghe unità stratigrafiche della pianura emiliana (Minarelli *et al.*, 2016; Petronio *et al.*, 2018), si può ragionevolmente supporre che il picco a più bassa frequenza possa corrispondere al passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici, dove questi ultimi rappresenterebbero il *bedrock sismico* per l'area (paragrafo 5.1).

Come visibile in Figura 6-2 e Figura 6-3 questa superficie è stata ampiamente deformata dalla tettonica attiva, ragion per cui essa si rinviene a profondità notevolmente variabile.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Nella porzione meridionale del territorio comunale, interessata dalla presenza della struttura anticlinale sepolta, tale superficie risulta più prossima alla superficie, con profondità inferiori ai 300 m (cfr. Figura 6-2, HVS11ter, HVS12bis; HVS13bis con frequenze comprese tra 0,30 e 0,35 Hz). Nella fascia settentrionale del territorio comunale essa si approfondisce rapidamente arrivando a superare i 600 m di profondità (Figura 6-3, misure HVS11bis, HVS13, HVS14bis, HVS15ter con frequenze comprese tra 0,24 – 0,2 Hz).

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

La principale criticità che interessa il territorio comunale di Sant'Agostino è legata alla diffusa presenza di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione.

La manifestazione di effetti di sito legati a fenomeni di liquefazione è stata ampiamente documentata in occasione del sisma del 2012, in particolare nella frazione di San Carlo, mentre la presenza di condizioni predisponenti a tali fenomeni è stata accertata per ampie aree costituenti gli ambiti di studio.

Gli studi realizzati durante l'emergenza sismica dalla Regione Emilia-Romagna e successivamente dall'Università di Ferrara, hanno consentito una prima mappatura delle aree aventi caratteristiche predisponenti la liquefazione, presenti in ampie porzioni del territorio comunale (Martelli e Romani, 2013). L'elevato numero di indagini acquisite durante lo studio di microzonazione ha consentito di meglio discriminare spessore e geometrie dei corpi liquefacibili soprattutto nelle aree prive di dati pregressi o con dati di scarsa affidabilità. Ciò ha portato alla revisione delle zone potenzialmente soggette a tali fenomeni, che sono state indicate nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica come Zone di Attenzione per Liquefazione (Tavole 4a e 4b, paragrafo 8.4).

Un consistente numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTU) archiviate in banca dati, ha infine permesso la realizzazione oltre 200 analisi puntuali del rischio liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale, ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni, ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 0).

Gli approfondimenti di terzo livello compiuti per lo studio di microzonazione hanno dunque ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi suscettibili a liquefazione. Preme comunque sottolineare che sia il contesto deposizionale, sia l'elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari, non permettono di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi in acqua anche in quelle porzioni di territorio non classificate come "Zone di Attenzione per Liquefazione". Questa affermazione risulta ancora più veritiera

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

nelle aree meno documentate da prove geognostiche, che nel caso specifico sono essenzialmente confinate in zone rurali.

Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, da realizzarsi, ad esempio, in occasione di nuove fasi di pianificazione territoriale e/o nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica è quella di giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici. Le zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura e come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del suolo, le zone sono identificate come **suscettibili di instabilità** e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Una corretta suddivisione in aree a diversa pericolosità, deve essere necessariamente basata su un modello di sottosuolo di dettaglio, la cui definizione compete al geologo. La bontà del modello è certamente funzione della disponibilità di dati geognostici e geofisici, ma altrettanto dell'esperienza del tecnico che lo definisce.

In contesti di pianura in cui la ricostruzione del sottosuolo è basata essenzialmente su informazioni derivanti da indagini puntuali, in numero anche molto rilevante e con distribuzione eterogenea, il compito del geologo può risultare particolarmente gravoso.

La ricostruzione dei primi 30 m di sottosuolo è stata ottenuta mediante la tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali correlata con le informazioni estratte dalle sezioni geologiche prodotte dalla Regione Emilia-Romagna per il "Foglio 203 - Poggio Renatico" del Progetto Nazionale CARG e in occasione del sisma 2012 (Allegato 1).

Nei paragrafi seguenti sono descritte le metodologie utilizzate per la definizione dei modelli sismo-stratigrafici, il calcolo dei fattori di amplificazione locale e la definizione del grado di rischio associato alle diverse aree classificate come instabili.

La conformazione e l'evoluzione geologica del territorio, oltre alle osservazioni degli effetti di sito prodotti dalla sequenza sismica emiliana, consentono di escludere la presenza di zone stabili, e di attribuire a quelle instabili problematiche sostanzialmente connesse ad amplificazione sismica e liquefazione dei terreni. Nelle

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

aree definite come instabili sono state, pertanto, eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione mediante metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale, applicate e verificate negli stessi contesti geologico-deposizionali in seguito agli eventi sismici del 2012.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

La sequenza sismica del 2012 ha permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (eg. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione del valore dell'amplificazione attesa può essere ottenuta sia attraverso l'utilizzo degli abachi di riferimento nazionali (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008) o regionali (D.G.R. 2193/2015), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

Per le aree classificate come soggette ad amplificazioni locali ed instabilità (cfr. liquefazione) la quantificazione dell'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) è stata ottenuta mediante calcolo della risposta sismica locale (RSL). I risultati sono stati poi confrontati con i fattori di amplificazione sismica proposti dagli abachi regionali (D.G.R. 2193/2015 e previgente D.A.L. 112/2007), al fine di verificare la coerenza dei coefficienti di amplificazione ottenuti attraverso i due differenti approcci e valutare l'applicabilità degli uni o degli altri all'intero territorio in esame.

7.1.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Sulla base di accurati dati stratigrafici, geofisici e geotecnici derivati sia dagli approfondimenti di terzo livello sia da precedenti studi di microzonazione sismica di aree limitrofe sono state eseguite modellazioni numeriche di risposta sismica locale. Considerando l'andamento del *bedrock sismico* (paragrafo 6.2, Allegato 1 - Sezione C-C'), sono state proposte 2 modellazioni in grado di evidenziare le differenze massime di profondità del substrato sismico nell'area di studio e sintetizzare le principali variazioni stratigrafiche all'interno dei terreni di copertura. I modelli sono stati denominati:

- RSL1 (Tabella 7-2), valido per l'alto anticlinalico della struttura tettonica denominata "Carpi - Poggio Renatico" che si sviluppa nel sottosuolo della fascia meridionale del territorio, tra la frazione di Dosso e la zona industriale di Sant'Agostino;
- RSL2 (Tabella 7-3), applicabile nella fascia sinclinalica che si sviluppa nel sottosuolo della porzione centro-settentrionale del territorio e interessa gli ambiti di Sant'Agostino e San Carlo, comprendendo anche l'area di Mirabello.

Le analisi di risposta sismica locale sono procedure di calcolo numerico che permettono di ricavare le funzioni di trasferimento del moto sismico dal bedrock alla superficie. Tali procedure necessitano pertanto

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

della definizione di un modello sismo-stratigrafico profondo che descriva le caratteristiche geotecniche e geofisiche delle successioni sedimentarie che ricoprono il bedrock sismico.

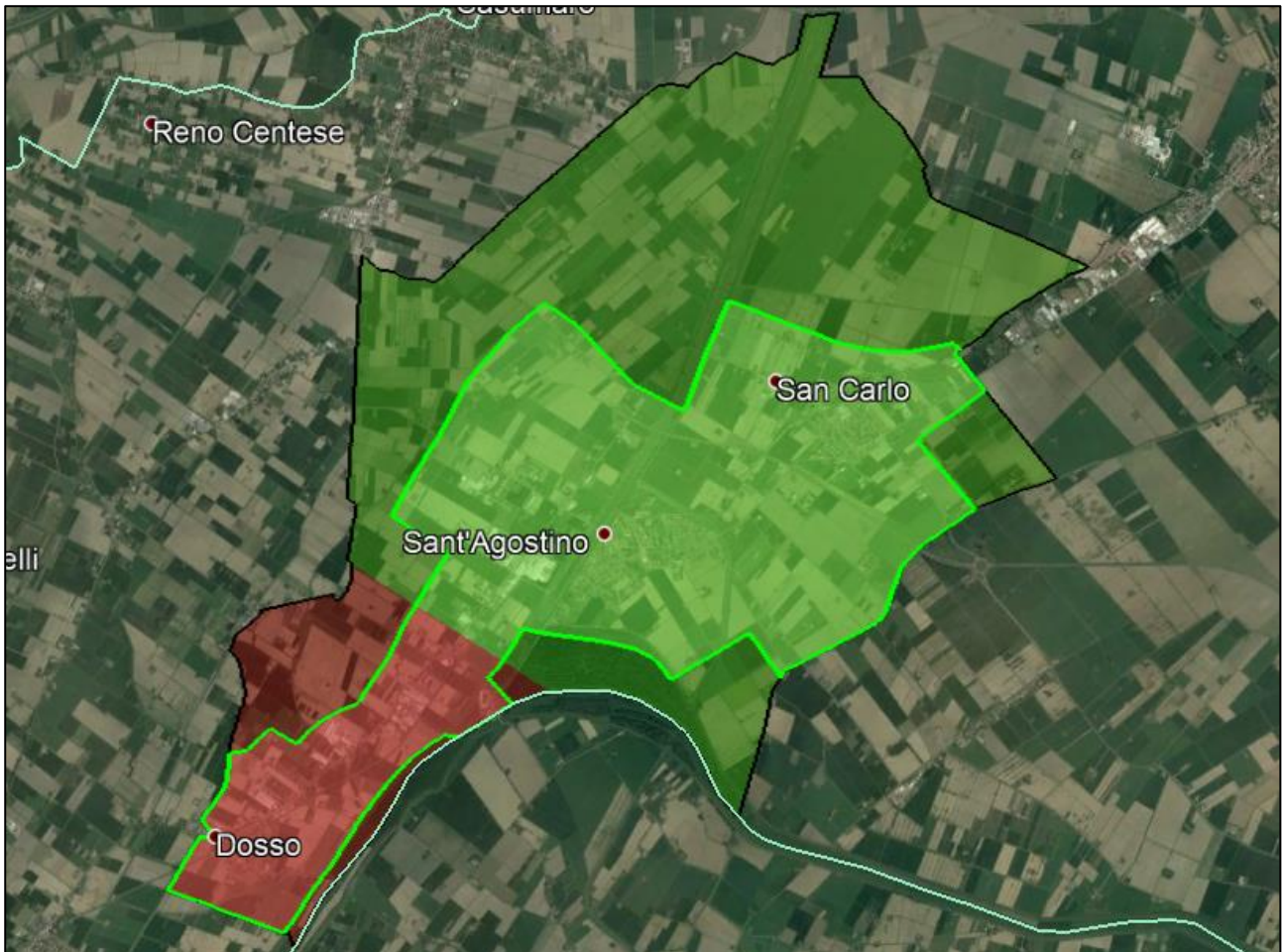


Figura 7-1 - Area del comune di Sant'Agostino oggetto della microzonazione sismica a cui sono associate le due diverse modellazioni di risposta sismica locale: RSL1 in rosso e RSL2 in verde.

I modelli sismo-stratigrafici proposti nello studio si basano sui risultati delle indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio, che hanno consentito la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono state descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale realizzate mediante confronto tra sezioni geologiche, sismiche e dati di pozzo.

I modelli sismo-stratigrafici e geotecnici sono stati definiti associando alle varie unità individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio V_s ottenuti dalle misure dirette e indirette disponibili (es. down-hole, ESAC) o da letteratura scientifica (Minarelli *et al.*, 2016); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute dalle prove dinamiche di laboratorio disponibili

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

o da indagini in sito con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) realizzate per precedenti studi di microzonazione (Allegato 2); (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

In Tabella 7-1 sono indicate, per ciascuna delle modellazioni di risposta sismica locale (RSL1, RSL2), le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	RSL1	RSL2
Descrizione	ALTO STRATIGRAFICO - ANTICLINALE (MOPS 2001, 2002, 2003, 2004)	BASSO STRATIGRAFICO - SINCLINALE (MOPS 2001, 2002, 2003, 2004)
Stratigrafia superficiale	038021P820CPTU893 (fino a 30 metri)	038021P750SCPT797 (fino a 30 metri)
Stratigrafia in profondità	038004P837S869 (fino a 92 metri - MS Cento)	038016P390SD390 (fino a 400 m - MS Mirabello)
Bedrock sismico	Sezione Cento-Occhiobello (Allegato 1 sez. C-C') 038021P838HVSR917 Correlazione con Pozzo Pieve di Cento 1 (Figura 6-1)	Sezione Cento-Occhiobello (Allegato 1 sez. C-C') 038021P845HVSR924 Correlazione con Pozzo Poggetto 1 (Figura 6-1)
VS superficiale	038021P820SCPT894 (fino a 30 metri)	038021P750SCPT797 (fino a 30 metri)
VS in profondità	038004P886ESAC_SPAC962 (MS Cento) + 038016P390DH431 (MS Mirabello)	038016P390DH431 (MS Mirabello)

Tabella 7-1 - Indicazione delle indagini e delle correlazioni da cui sono stati tratti i dati per la ricostruzione dei due modelli sismo-stratigrafici di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

Le correlazioni tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), profili sismici (Figura 5-2), e le curve di ellitticità (H/V) ottenute dalle nuove misure di microtremore (paragrafo 6.1), hanno permesso di identificare i maggiori contrasti di impedenza nel sottosuolo e stimare natura e profondità del bedrock sismico (paragrafi 5.1 e 6.2). Sulla base di tali analisi il substrato sismico, posto in corrispondenza della base dei depositi del Quaternario Marino (QM), è stato assunto ad una profondità di 275 m nella modellazione relativa alla zona meridionale di anticlinale (RSL1, Tabella 7-2) e di 700 m per la zona centro-settentrionale di sinclinale (RSL2).

La stima delle velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock ed i primi 70-80 m di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di Vs acquisti, mediante down-hole profondo, durante lo studio di microzonazione di terzo livello del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016). L'estrapolazione dei dati di Mirabello all'area in esame è stata possibile considerando che oltre ad essere confinanti, i due territori si inquadrano nel medesimo contesto geologico-strutturale che determina la presenza delle medesime unità stratigrafiche inquadrato nel Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono state considerate opportune correzioni nei valori di Vs legate al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree del territorio comprese tra Dosso e

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Mirabello. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Infine come velocità delle onde di taglio per il bedrock sismico è stato assunto un valore in linea con quelli di unità stratigrafiche analoghe misurati mediante tecnica down-hole in aree limitrofe (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016), in grado di riprodurre l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSR (cfr. Figura 7-4 e Figura 7-7).

In Tabella 7-2 e Tabella 7-3 sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti.

Profondità	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0	3.5	Poggio Renatico -P470CR502- (3.6m) - LdS	105
3.5	6.5	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	130
10	4.5	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	204
14.5	4.2	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	230
18.7	3.3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	224
22	1.7	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	258
23.7	7.5	Pilastrello S1SH3 (28,2-28,8) AL	222
31.2	7.7	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	280
38.9	6	Mirabello M1 C4 - UNIFI (36-36.6) - AL + T	260
44.9	9	Mirabello SDMT - Sf + L	323
53.9	4.1	Mirabello M1 C4 - UNIFI (36-36.6) - AL + T	300
58	7	Mirabello SDMT - Sf + L	320
65	6	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A	325
71	6	Mirabello SDMT - Sf + L	330
77	4	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	399
81	4	Mirabello SDMT - Sf + L	355
85	7	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	357
92	8	Mirabello SDMT - Sf + L	360
100	27	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	379
127	11	Mirabello SDMT - Sf + L	385
138	12	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	370
150	21	Mirabello SDMT - Sf + L	485
171	16	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	450
187	21	Mirabello SDMT - Sf + L	453
208	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	419
233	17	Mirabello SDMT - Sf + L	446
250	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	512
275	Half-Space	Bedrock	1200

Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL1 - Zona di anticlinale.

Profondità	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0	2.3	Poggio Renatico (3.6 m) - LdS	115
2.3	5.7	Mirabello - M1 C1 - UNIFI (4.7-5.2) - Sfl	145
8	8.2	Mirabello - M1 C2 - UNIFI (12-12.6) - AL org.	186.5
16.2	2.8	San Carlo S10 C2 - ISMGEO - SL deb.A	202.42
19	8	Mirabello - M1 C3 - UNIFI (17.5-18) - AL + T	210.53

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

27	4	San Carlo S10 C2 - ISMGEO - SL deb.A	221.59
31	14	Mirabello M1 C4 - UNIFI (36-36.6) - AL + T	279.19
45	12.6	Mirabello M1 C4 - UNIFI (36-36.6) - AL + T	354.88
57.6	18.4	Mirabello SDMT Sf+L	357.66
76	7	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	359.02
83	17	Mirabello SDMT Sf+L	379.06
100	27	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	379.06
127	11	Mirabello SDMT Sf+L	379.06
138	19	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	379.06
157	21	Mirabello SDMT Sf+L	489.32
178	16	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	489.56
194	21	Mirabello SDMT Sf+L	489.92
215	33	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	489.92
248	17	Mirabello SDMT Sf+L	489.92
265	27	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	496.74
292	11	Mirabello SDMT Sf+L	512.26
303	7	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	512.26
310	17	Mirabello SDMT Sf+L	519.45
327	23	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	542.35
350	14	Mirabello SDMT Sf+L	546.37
364	11	Mirabello SDMT Sf+L	572.43
375	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	572.43
400	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	600.94
425	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	613.95
450	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	632.6
475	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	719.41
500	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	741.16
525	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	743.85
550	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	748.18
575	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	750.77
600	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	753.35
625	25	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	757.19
650	50	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	757.19
700	Half-Space	Mirandola - S1 C4 - RER (69.7-70.1) - L + A	1200

Tabella 7-3 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL2- Zona di sinclinale

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7-2, Tabella 7-3), sono state eseguite alcune simulazioni numeriche di analisi di risposta sismica locale variando i profili stratigrafici dei primi 30 m di sottosuolo, sulla base delle caratteristiche delle diverse MOPS individuate nello studio. Le simulazioni, realizzate mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), hanno mostrato una sostanziale omogeneità all'interno delle 2 macro-aree considerate (Figura 7-1). Ciò ha permesso di confermare la validità dei singoli modelli di risposta sismica locale, che possono essere considerati rappresentativi delle macro-aree individuate.

Come accelerogrammi di input (*bedrock*) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-2).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di a_{gref} derivante dai punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale. Tale valore può essere assunto pari a 0,15 g, in considerazione di un valore medio tra quelli dei punti ricadenti nel territorio del Comune di Sant'Agostino e di quelli dell'immediato intorno.

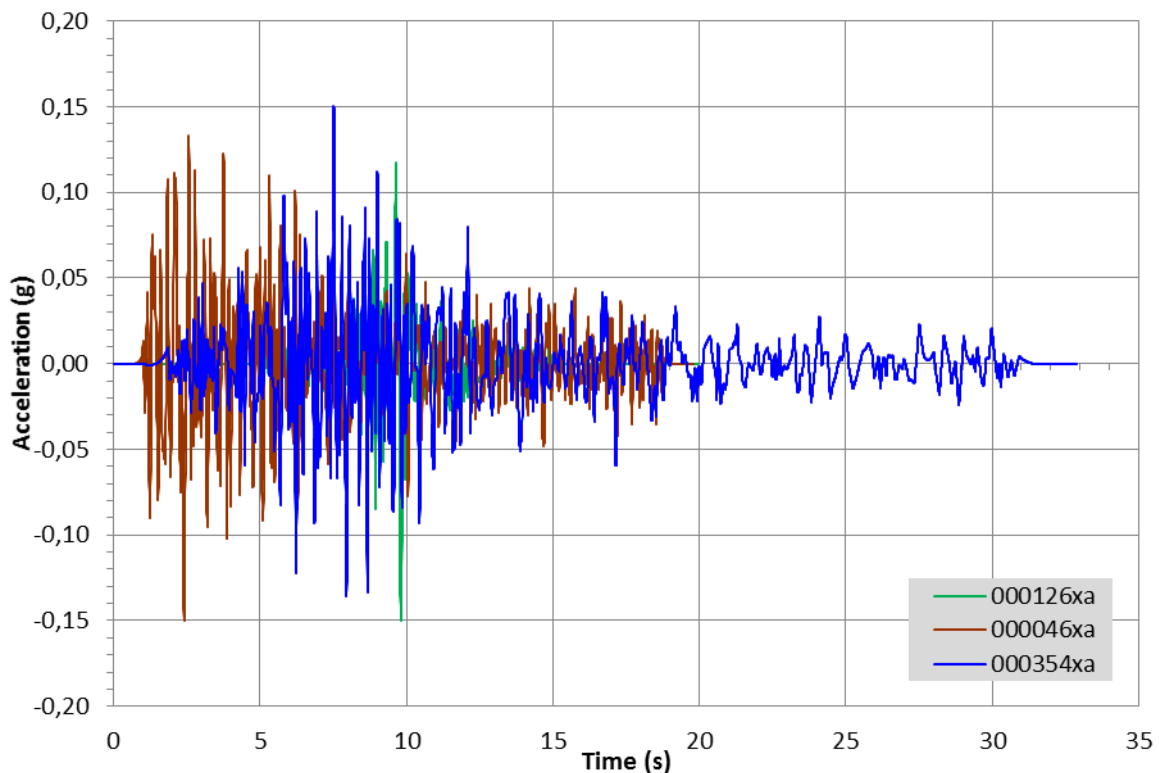


Figura 7-2 - Accelerogrammi di input utilizzati per le simulazioni numeriche di risposta sismica locale. I segnali di riferimento, forniti dalla Regione Emilia-Romagna (D.G.R. 2193 del 2015), sono stati scalati rispetto alla pericolosità sismica di base dell'area ad un valore di a_{gref} pari a 0,15.

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al *bedrock* (Figura 7-3) ed in superficie per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in pseudo accelerazione in input e in output, relativi alla simulazione di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nel database in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.0b (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

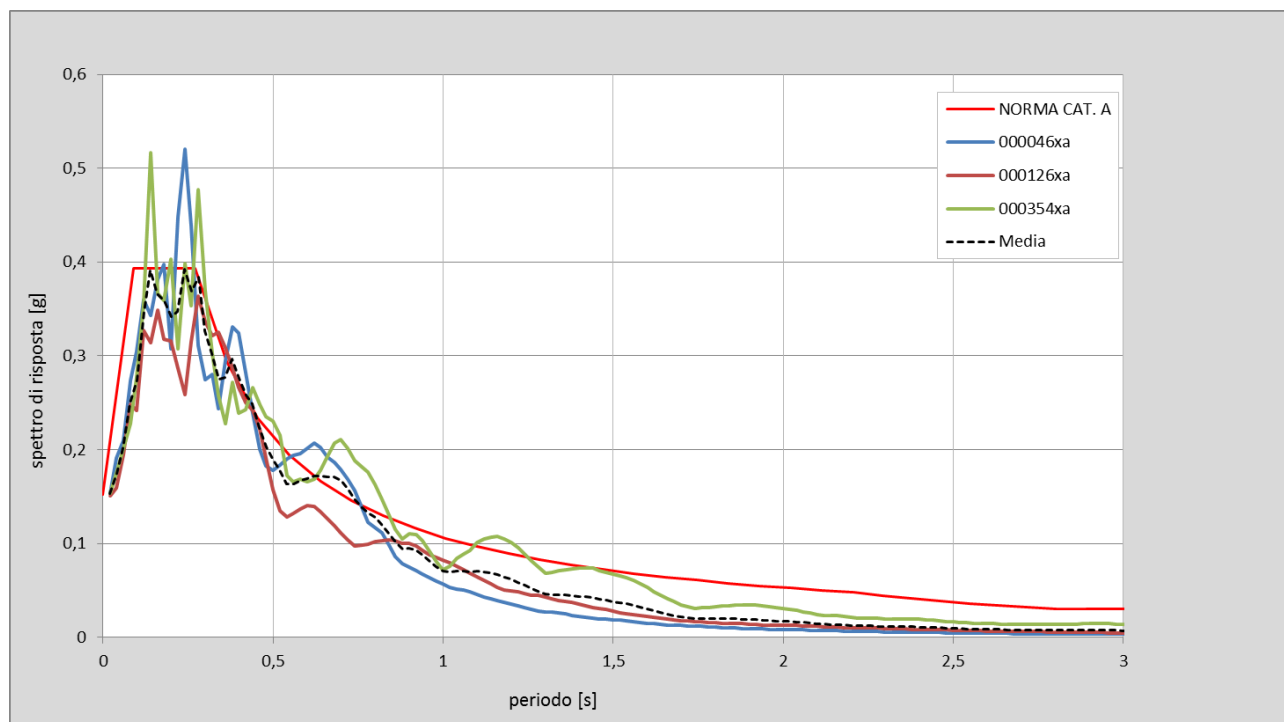


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi ed il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2018.

RSL1

In Figura 7-4 si riporta la funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Si osserva una prima amplificazione a frequenza compresa tra 0.35 Hz e una seconda a circa 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale, e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

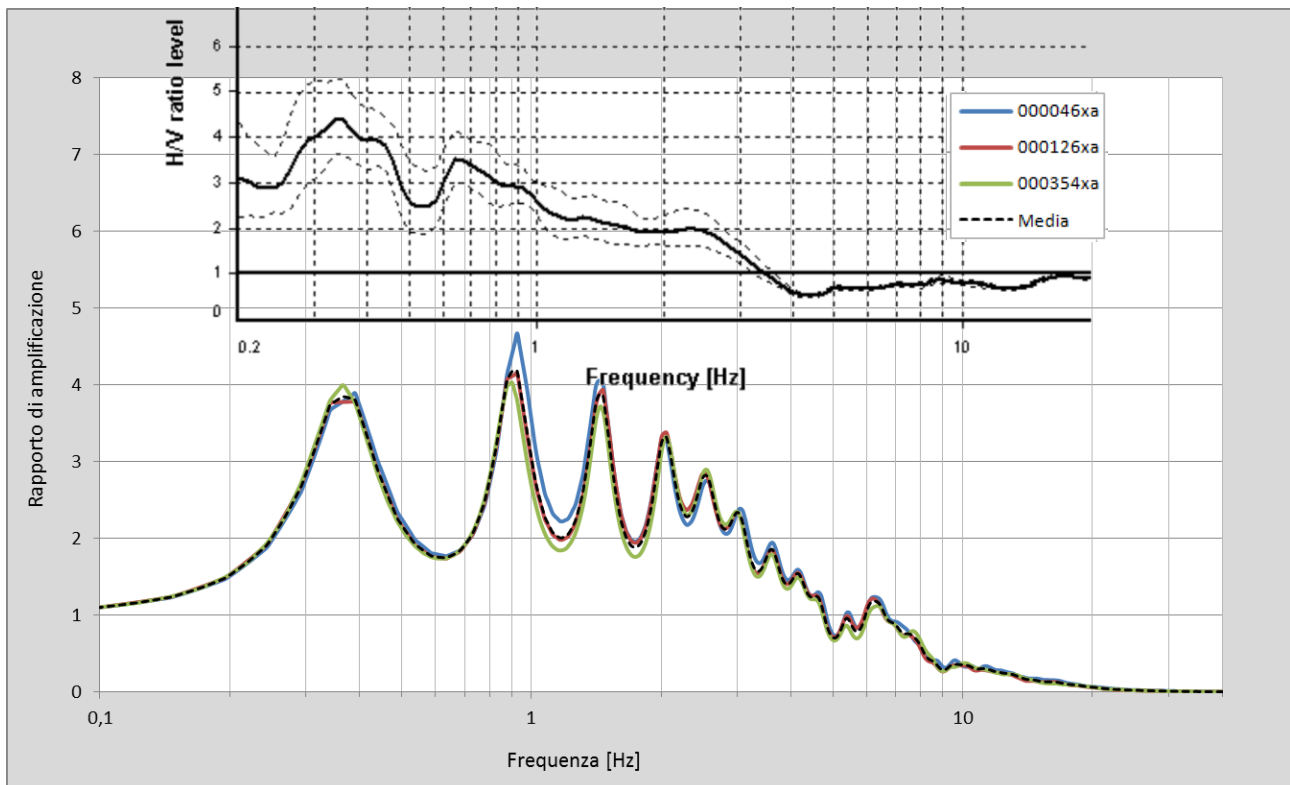


Figura 7-4 - RSL1: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media. Dalla figura è possibile verificare il buon accordo tra le frequenze ottenute dalla modellazione di risposta sismica locale e il dato sperimentale acquisito mediante misure di rumore sismico ambientale.

In Figura 7-5 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro medio. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro medio risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

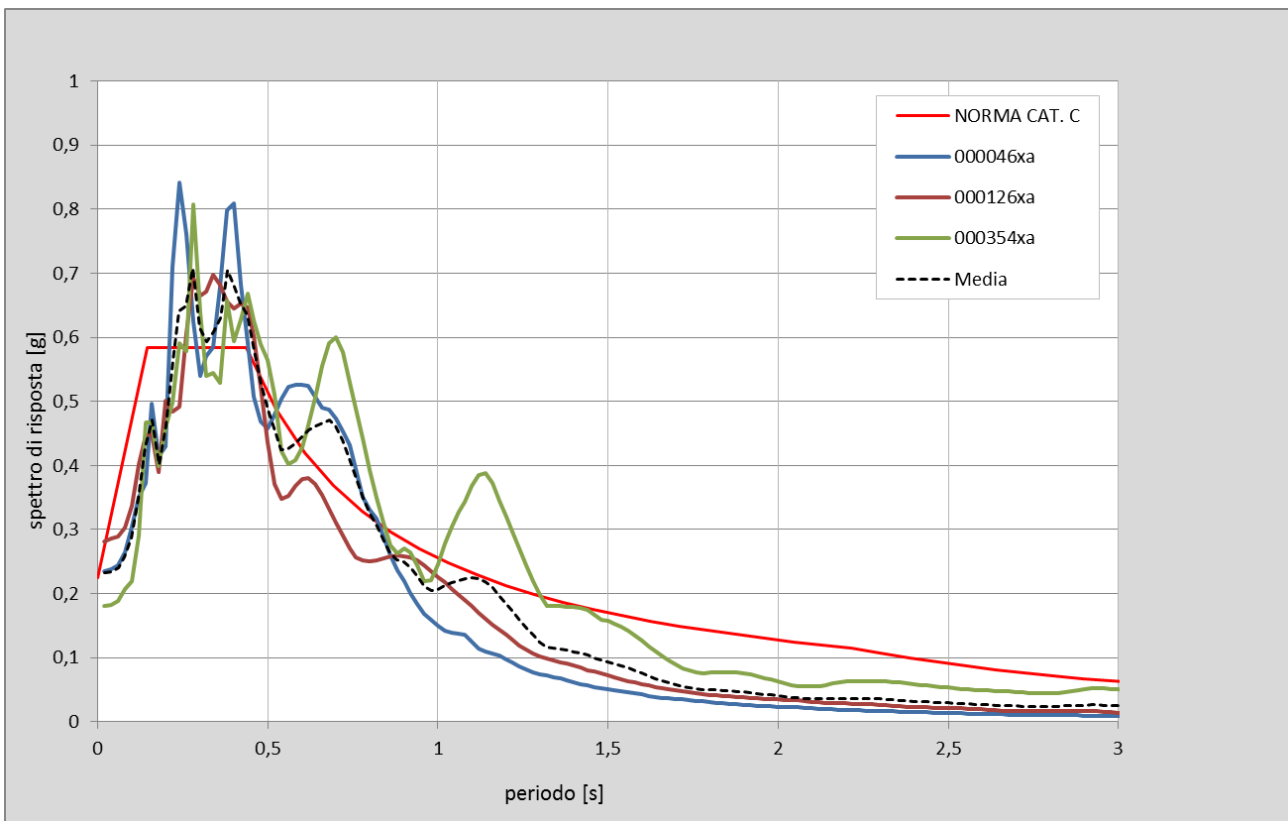


Figura 7-5 - RSL1: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-6 è infine riportato l'andamento, nei primi 20 m di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra 4 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

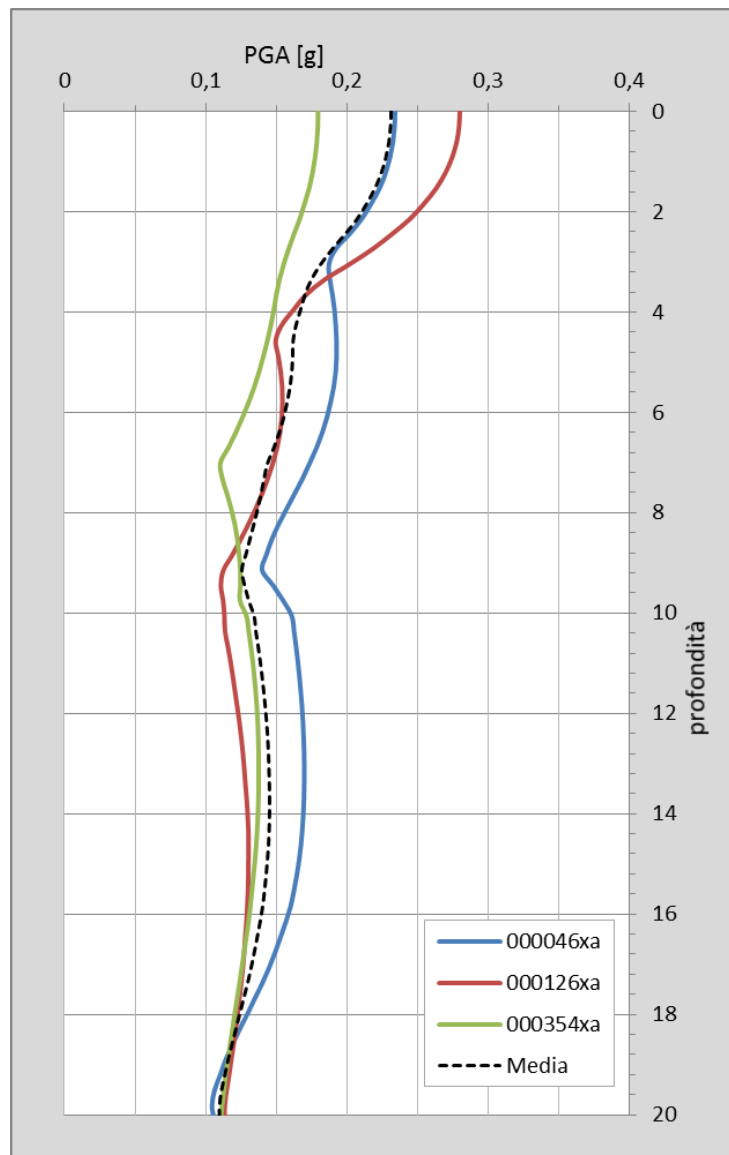


Figura 7-6 - RSL1: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,23 g (Figura 7-6) si ottiene un fattore di amplificazione **FA(PGA) = 1,5**.

Per la zona **RSL1** (in rosso in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a:

$$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.8$$

$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.7$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.7$$

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

RSL2

In Figura 7-7 si riporta la funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Si osserva una prima amplificazione a frequenza a 0,25 Hz e una a circa 0,6 - 0,8 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale, ed a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

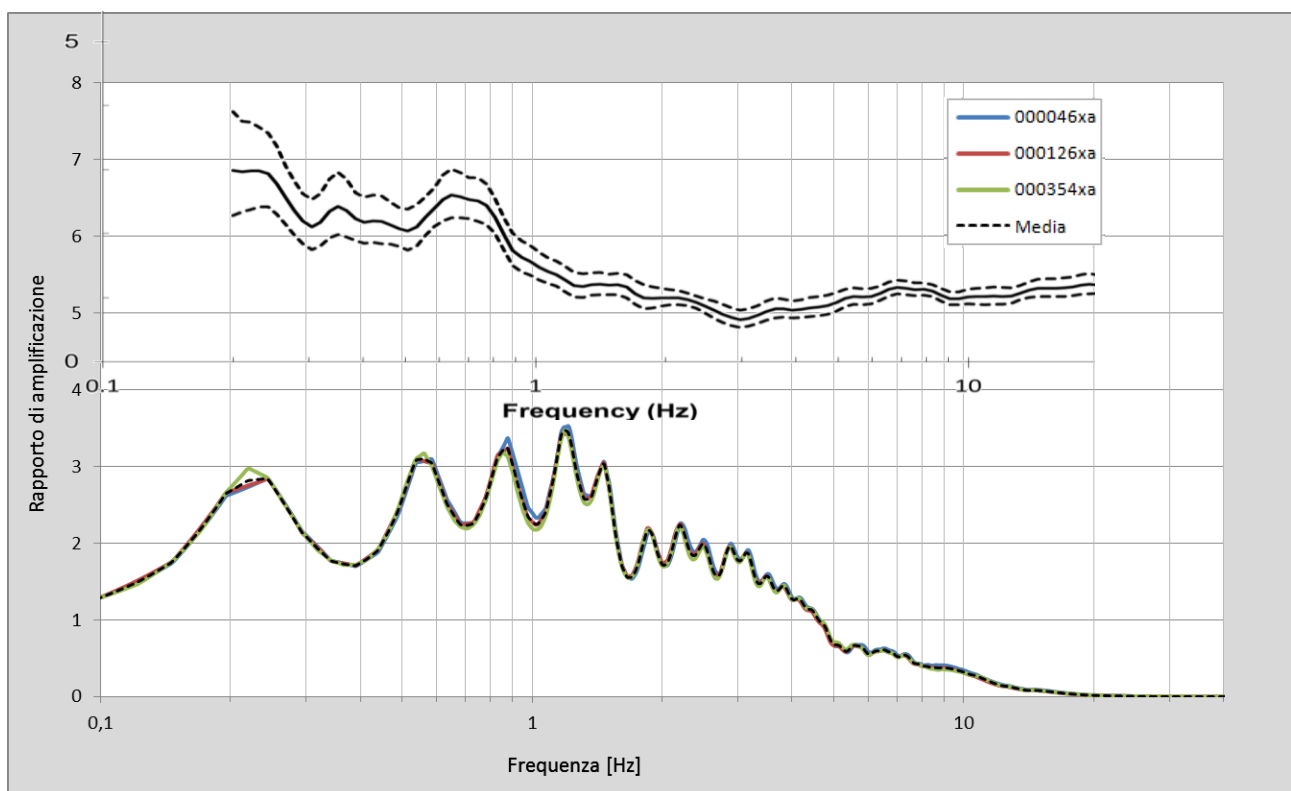


Figura 7-7 - RSL2: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media. Dalla figura è possibile verificare il buon accordo tra le frequenze ottenute dalla modellazione di risposta sismica locale e il dato sperimentale acquisito mediante misure di rumore sismico ambientale.

In Figura 7-8 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro medio. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro medio risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

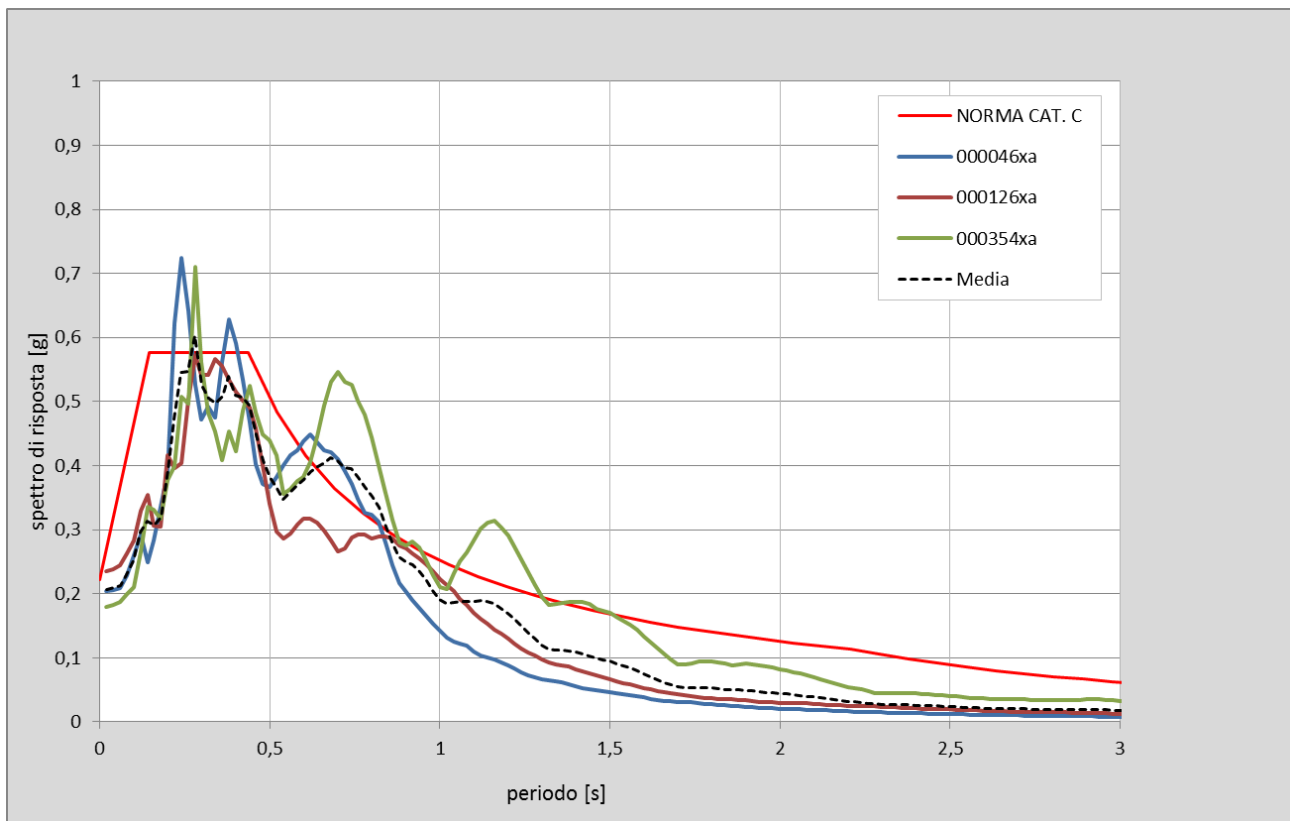


Figura 7-8 - RSL2: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-9 è infine riportato l'andamento, nei primi 20 metri di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra 5 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

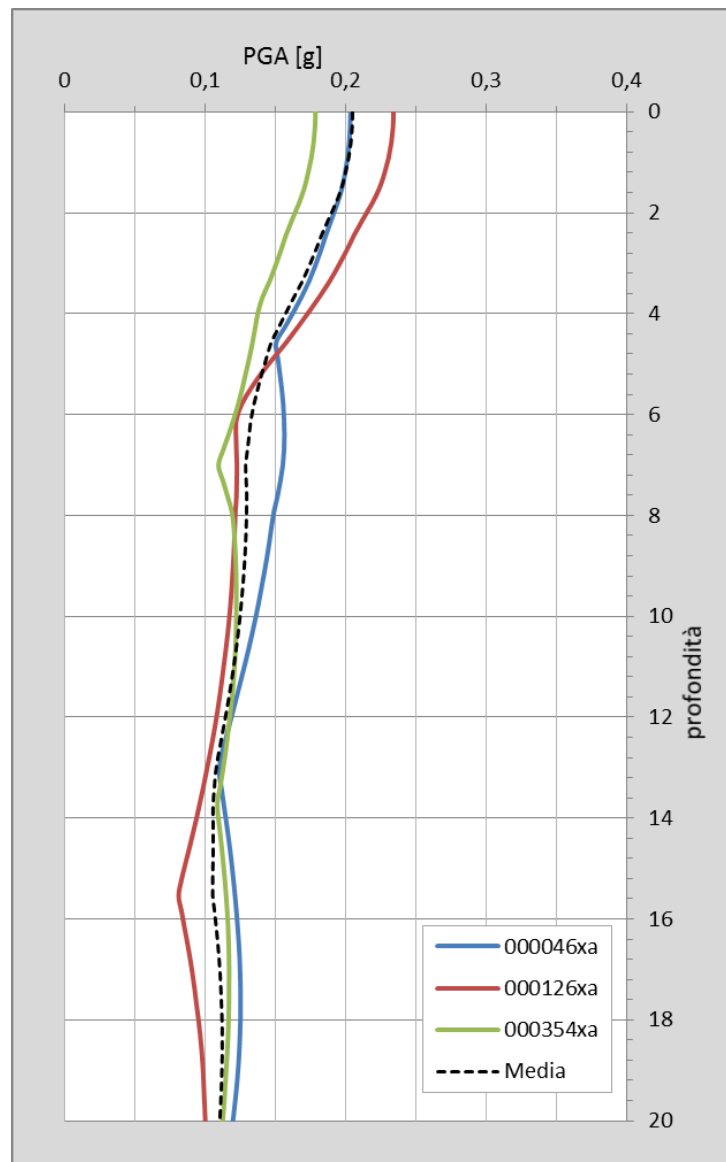


Figura 7-9 - RSL2: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,20 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,3$.

Per la zona **RSL2** (in verde in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a:

$$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.5$$

$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.5$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.5$$

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Per valutarne la consistenza e l'affidabilità complessiva dei modelli sismo-stratigrafici proposti e dei dati ottenuti dalle modellazioni è possibile mettere a confronto i fattori di amplificazione calcolati con quanto indicato dagli abachi regionali.

La zona di sinclinale (RSL2) presenta una stratigrafia coerente con quanto indicato nella D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3": *"settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti, con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c"*. Di conseguenza i risultati della risposta sismica hanno restituito fattori di amplificazione prossimi a quelli dell'abaco di riferimento (cfr. Tabella 7-4).

	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 2193/2015	RSL2
FA_{PGA}	1.3	1.34
FA_{S11}	1.5	1.46
FA_{S12}	2.3	2.46
FA_{S13}	2.6	2.5

Tabella 7-4 - Fattori di amplificazione ottenuti dalla modellazioni rappresentativa dell'area di sinclinale (RSL2) confrontate con quanto previsto dagli abachi della D.G.R. 2193/2015 per le aree di "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) caratterizzate da V_{s30} di circa 200 m/s.

La D.G.R. 2193/2015 non prevede però abachi specifici per settori di pianura con substrato rigido a profondità comprese tra 200 e 300 m, come l'area di anticlinale di Dosso (RSL1), ma solo per zone con bedrock a meno di 100 m ("Pianura 1"), a circa 150 m ("Pianura 2") e oltre 300 m ("Pianura 3") dalla superficie topografica. Come logico i fattori di amplificazione calcolati a partire dalla modellazione RSL1, mostrano valori intermedi tra quelli proposti per "Pianura 2" e "Pianura 3" dalla D.G.R. 2193/2015 (Tabella 7-5) che al contempo appaiono coerenti con i fattori proposti dalla ormai superata D.A.L. 112/2007, che prevedeva un abaco "Pianura 2" per aree con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.).

	ABACO PIANURA 2	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 2193/2015	Media P2-P3	ABACO PIANURA 2 D.A.L.112/2007	RSL1
FA_{PGA}	1.7	1.3	1.5	1.5	1.51
FA_{S11}	2.0	1.5	1.75	1.8	1.82
FA_{S12}	3.0	2.3	2.65	2.5	2.66
FA_{S13}	3.3	2.6	2.95	-	2.71

Tabella 7-5 - Fattori di amplificazione ottenuti dalla modellazione per le aree di anticlinale (RSL) a confronto con: 1) quelli previsti dalla D.G.R. 2193/2015 per le aree di "Pianura 2" (bedrock a circa 150 m dal p.c.), "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) e la loro media; 2) quelli previsti dalla D.A.L.112/2007 per le aree di "Pianura 2" (bedrock a oltre 100 m dal p.c.). Valori definiti per aree caratterizzate da V_{s30} di circa 200 m/s.

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Tra le principali instabilità sismoindotte in grado di determinare deformazioni permanenti del suolo gli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) indicano:

- liquefazioni;
- instabilità di versante;
- cedimenti differenziali;
- faglie attive e capaci.

Per le zone suscettibili di tali possibili effetti la normativa vigente richiede approfondimenti di terzo livello. Considerando il carattere pianeggiante del territorio ed il contesto sismotettonico in cui si colloca il Comune di Sant'Agostino, le instabilità attese si riducono a potenziali fenomeni di liquefazione e cedimenti differenziali.

I numerosi dati geognostici raccolti a supporto dello studio di microzonazione, sono stati singolarmente valutati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni attraversati. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando come principale criticità la frequente presenza di orizzonti granulari saturi potenzialmente liquefacibili, così come riportato negli elaborati di sintesi redatti a seguito dell'Ordinanza 70/2012 (Martelli e Romani, 2013).

L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata notevolmente affinata (v. Tavola 4) sulla base dei risultati ottenuti dall'elaborazione di nuove indagini geognostiche acquisite nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.1). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state eseguite stime dell'indice di potenziale liquefazione (I_L) con le procedure semplificate indicate dai recenti indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono state eseguite su tutte le indagini penetrometriche con piezocono, archiviate durante lo studio di microzonazione sismica (v. Allegato 3).

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di terremoti con magnitudo $M > 5.5$ e interessa i sedimenti granulari (limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose) poco addensati e saturi in acqua presenti nei primi 15-20 m di sottosuolo.

Durante l'evento sismico la pressione interstiziale dell'acqua, che è fluido incompressibile, aumenta fino ad eguagliare le tensioni efficaci che legano i sedimenti granulari. L'annullamento della resistenza al taglio dovuto alle sovrappressioni indotte dallo scuotimento conduce alla liquefazione dei terreni, con

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

conseguente perdita di capacità portante degli stessi e manifestazione di deformazioni permanenti, come ampiamente osservato nell'area in occasione della sequenza sismica del 2012.

Già durante gli studi relativi all'Ordinanza 70/2012, furono effettuate stime del potenziale di liquefazione su alcune decine di indagini penetrometriche (v. Allegato 1.7 - Ordinanza 70/2012) mediante diverse procedure semplificate suggerite dai vigenti indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, Allegato 3) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Il confronto tra i vari metodi di letteratura utilizzati, tutti basati su analisi di prove penetrometriche, aveva permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione I_L (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti con il metodo di Idriss e Boulanger (2008) fossero i meglio compatibili con gli effetti osservati, e venissero dunque utilizzati per la redazione delle mappe.

Per gli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione anche con il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, che ha mediamente fornito indici più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss e Boulanger, 2008; Robertson NCEER, 2001 e Robertson, 2009). Il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, è stato considerato maggiormente cautelativo ed affidabile e quindi utilizzato per la stima del potenziale di liquefazione.

Sono state quindi analizzate 207 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica e piezocono (CPTU) distribuite come riportato in Tavola 6.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-6. Il valore di Mw_{max} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre la PGA è stata derivata moltiplicando ag_{ref} per i fattori ottenuti dalla risposta sismica locale (cfr. paragrafo 7.1.1) cioè per:

- 1,5 (cfr. FA_{PGA} abaco "Pianura 2" - D.A.L. 112/2007) per le zone di "alto" stratigrafico - anticlinale (Dosso, Roversetto e area industriale di Sant'Agostino);
- 1,3 (cfr. FA_{PGA} abaco "Pianura 3" - D.G.R. 2193/2015) per le zone di "basso" stratigrafico - sinclinale (Sant'Agostino e San Carlo).

In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, la soggiacenza della falda è stata considerata variabile tra 1 e 3 m di profondità a seconda che il sito di verifica ricadesse in area di piana interalvea o di dosso morfologico, in accordo con quanto effettuato durante gli studi post-sismici regionali (v. Allegato 1.7 - Ordinanza 70/2012).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Parametri	Mwmax	PGA (g)	Falda (m)
Zona di sinclinale	6,14	0,20	1 m (in <u>assenza</u> di dosso morfologico) 3 m (in <u>presenza</u> di dosso morfologico)
Zona di anticlinale	6,14	0,23	1 m (<u>nessuna presenza</u> di dossi morfologici)

Tabella 7-6 - Parametri di input per la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger e Idriss (2014).

I valori puntuali di I_L ottenuti mediante il software "Cliq 2.0" della *Geologismiki Geotechnical Software*, sono rappresentati in carta (Tavole da 6 a 9) suddivisi per classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra aree a rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), moderato ($2 < I_L \leq 5$) e alto ($5 < I_L \leq 15$).

In Tabella 7-7 sono riportati i valori di I_L relativi alle 207 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello, mentre i rapporti di calcolo delle verifiche effettuate sono raccolti nell'Allegato 3 alla presente relazione.

Codice	Lat.	Lon.	Falda (m)	PGA (g)	IL Boulanger e Idriss (2014)
038021P479CPTU489	44,7799	11,3566	1,00	0,23	2,80
038021P481CPTU491	44,7600	11,3422	1,00	0,23	3,50
038021P484CPTU494	44,7841	11,3508	1,00	0,23	3,90
038021P487CPTU497	44,7625	11,3421	1,00	0,23	4,90
038021P488CPTU498	44,7799	11,3586	1,00	0,23	1,30
038021P489CPTU499	44,7794	11,3598	1,00	0,23	1,00
038021P490CPTU500	44,7793	11,3606	1,00	0,23	2,80
038021P491CPTU501	44,7799	11,3603	1,00	0,23	5,80
038021P492CPTU502	44,7804	11,3592	1,00	0,23	1,00
038021P493CPTU503	44,7803	11,3583	1,00	0,23	2,40
038021P680CPTU691	44,7783	11,3415	1,00	0,23	7,90
038021P682CPTU693	44,7800	11,3567	1,00	0,23	4,50
038021P683CPTU694	44,7762	11,3422	1,00	0,23	7,60
038021P687CPTU698	44,7666	11,3374	1,00	0,23	8,10
038021P688CPTU699	44,7665	11,3372	1,00	0,23	6,20
038021P731CPTU758	44,7782	11,3413	1,00	0,23	6,50
038021P732CPTU760	44,7802	11,3569	1,00	0,23	3,80
038021P733CPTU762	44,7765	11,3421	1,00	0,23	6,60
038021P747CPTU790	44,7817	11,3657	1,00	0,23	1,10
038021P771CPTU826	44,7634	11,3307	1,00	0,23	1,00
038021P773CPTU830	44,7666	11,3324	1,00	0,23	6,40
038021P774CPTU831	44,7664	11,3327	1,00	0,23	5,60
038021P775CPTU832	44,7665	11,3327	1,00	0,23	6,40
038021P776CPTU833	44,7667	11,3329	1,00	0,23	10,50
038021P777CPTU834	44,7669	11,3326	1,00	0,23	7,60
038021P816CPTU886	44,7699	11,3500	1,00	0,23	2,10

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

038021P815CPTU885	44,7697	11,3498	1,00	0,23	2,30
038021P820CPTU893	44,7666	11,3349	1,00	0,23	6,00
038021P1CPTU1	44,8134	11,3976	1,00	0,20	3,80
038021P2CPTU3	44,8132	11,3800	1,00	0,20	0,00
038021P3CPTU5	44,8311	11,3871	1,00	0,20	0,70
038021P4CPTU7	44,8048	11,4070	3,00	0,20	3,80
038021P5CPTU9	44,8042	11,4090	3,00	0,20	8,00
038021P6CPTU11	44,8027	11,4083	3,00	0,20	9,80
038021P7CPTU13	44,8065	11,4109	3,00	0,20	5,40
038021P8CPTU15	44,8062	11,4137	3,00	0,20	6,70
038021P9CPTU17	44,8060	11,4131	3,00	0,20	6,20
038021P106CPTU115	44,8036	11,3849	1,00	0,20	4,50
038021P107CPTU116	44,8027	11,3877	1,00	0,20	3,70
038021P108CPTU117	44,8023	11,3893	1,00	0,20	4,00
038021P110CPTU119	44,8029	11,3870	1,00	0,20	2,80
038021P111CPTU120	44,8021	11,3902	1,00	0,20	6,80
038021P112CPTU121	44,7999	11,4045	3,00	0,20	3,00
038021P176CPTU185	44,8131	11,3908	1,00	0,20	0,40
038021P177CPTU186	44,8134	11,3867	1,00	0,20	0,20
038021P178CPTU187	44,8135	11,3787	1,00	0,20	1,60
038021P179CPTU188	44,8130	11,3779	1,00	0,20	0,00
038021P180CPTU189	44,8130	11,3729	1,00	0,20	1,10
038021P181CPTU190	44,8135	11,3719	1,00	0,20	1,20
038021P182CPTU191	44,8139	11,3632	1,00	0,20	2,00
038021P183CPTU192	44,8151	11,3579	1,00	0,20	0,20
038021P184CPTU193	44,8311	11,3872	1,00	0,20	1,60
038021P185CPTU194	44,8298	11,3849	1,00	0,20	1,10
038021P187CPTU196	44,8136	11,4074	1,00	0,20	4,60
038021P188CPTU197	44,8123	11,4003	1,00	0,20	2,50
038021P189CPTU198	44,8164	11,3541	1,00	0,20	1,10
038021P190CPTU199	44,8170	11,3957	1,00	0,20	0,10
038021P191CPTU200	44,8027	11,4061	3,00	0,20	5,20
038021P192CPTU201	44,8036	11,4072	3,00	0,20	7,00
038021P193CPTU202	44,8037	11,4079	3,00	0,20	6,10
038021P194CPTU203	44,8038	11,4088	3,00	0,20	4,20
038021P196CPTU205	44,8050	11,4103	3,00	0,20	3,50
038021P197CPTU206	44,8055	11,4112	3,00	0,20	3,50
038021P198CPTU207	44,8060	11,4129	3,00	0,20	5,20
038021P199CPTU208	44,8062	11,4135	3,00	0,20	7,40
038021P200CPTU209	44,8063	11,4146	3,00	0,20	8,00
038021P201CPTU210	44,8016	11,3813	1,00	0,20	1,30
038021P212CPTU222	44,8013	11,4254	1,00	0,20	3,10

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

038021P213CPTU223	44,8044	11,4232	1,00	0,20	1,20
038021P214CPTU224	44,8046	11,4237	1,00	0,20	1,20
038021P215CPTU225	44,8077	11,4198	3,00	0,20	0,30
038021P473CPTU483	44,7928	11,3869	3,00	0,20	5,00
038021P474CPTU484	44,7934	11,3869	3,00	0,20	4,90
038021P475CPTU485	44,7927	11,3820	3,00	0,20	5,30
038021P476CPTU486	44,7928	11,3820	3,00	0,20	5,00
038021P477CPTU487	44,7879	11,3788	1,00	0,20	5,00
038021P478CPTU488	44,7875	11,3793	1,00	0,20	3,80
038021P480CPTU490	44,7867	11,4024	1,00	0,20	6,50
038021P482CPTU492	44,7970	11,3775	1,00	0,20	2,90
038021P483CPTU493	44,7820	11,3902	1,00	0,20	2,30
038021P485CPTU495	44,7858	11,3882	1,00	0,20	1,00
038021P486CPTU496	44,7971	11,3866	1,00	0,20	3,20
038021P497CPTU507	44,7973	11,4306	1,00	0,20	4,60
038021P498CPTU508	44,7966	11,4286	1,00	0,20	3,60
038021P571CPTU581	44,8016	11,4169	1,00	0,20	1,60
038021P662CPTU673	44,8000	11,3651	1,00	0,20	2,20
038021P664CPTU675	44,8033	11,4081	3,00	0,20	8,20
038021P665CPTU676	44,8035	11,4087	3,00	0,20	8,20
038021P666CPTU677	44,8036	11,4084	3,00	0,20	4,80
038021P667CPTU678	44,8037	11,4084	3,00	0,20	5,70
038021P668CPTU679	44,8036	11,4082	3,00	0,20	5,40
038021P669CPTU680	44,8066	11,3867	1,00	0,20	0,00
038021P670CPTU681	44,8042	11,4168	1,00	0,20	13,60
038021P671CPTU682	44,8031	11,4067	3,00	0,20	9,60
038021P673CPTU684	44,8306	11,3916	1,00	0,20	0,80
038021P674CPTU685	44,8304	11,3917	1,00	0,20	1,30
038021P675CPTU686	44,8108	11,3812	1,00	0,20	0,00
038021P676CPTU687	44,8110	11,3813	1,00	0,20	0,00
038021P677CPTU688	44,8193	11,3877	1,00	0,20	0,90
038021P678CPTU689	44,8223	11,3986	1,00	0,20	0,30
038021P679CPTU690	44,8048	11,3665	1,00	0,20	1,70
038021P684CPTU695	44,8199	11,3945	1,00	0,20	0,00
038021P685CPTU696	44,7891	11,3646	1,00	0,20	1,50
038021P686CPTU697	44,7933	11,4162	1,00	0,20	6,60
038021P689CPTU700	44,8031	11,4069	3,00	0,20	8,90
038021P690CPTU701	44,7899	11,3562	1,00	0,20	0,60
038021P692CPTU703	44,7979	11,4127	1,00	0,20	2,90
038021P695CPTU706	44,8120	11,4003	1,00	0,20	2,90
038021P696CPTU707	44,8077	11,3531	1,00	0,20	5,50
038021P698CPTU709	44,8040	11,4059	3,00	0,20	4,10

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

038021P699CPTU710	44,8039	11,4061	3,00	0,20	5,10
038021P700CPTU711	44,8107	11,3918	1,00	0,20	3,60
038021P704CPTU715	44,8066	11,4117	3,00	0,20	6,30
038021P705CPTU716	44,8063	11,4116	3,00	0,20	6,20
038021P706CPTU717	44,8063	11,4116	3,00	0,20	7,90
038021P707CPTU718	44,8065	11,4118	3,00	0,20	6,80
038021P708CPTU719	44,8057	11,4087	3,00	0,20	4,50
038021P709CPTU720	44,8054	11,4085	3,00	0,20	4,30
038021P710CPTU721	44,8061	11,4132	3,00	0,20	6,70
038021P711CPTU722	44,8061	11,4096	3,00	0,20	3,40
038021P712CPTU723	44,8103	11,3769	1,00	0,20	2,00
038021P713CPTU724	44,8100	11,3768	1,00	0,20	3,90
038021P716CPTU728	44,8032	11,4083	3,00	0,20	5,00
038021P717CPTU730	44,8035	11,4083	3,00	0,20	5,30
038021P718CPTU732	44,8059	11,4105	3,00	0,20	6,10
038021P719CPTU734	44,8065	11,3870	1,00	0,20	0,00
038021P720CPTU736	44,8038	11,4162	1,00	0,20	13,00
038021P721CPTU738	44,7941	11,3548	1,00	0,20	2,20
038021P722CPTU740	44,7920	11,4003	1,00	0,20	7,50
038021P725CPTU746	44,8073	11,3825	1,00	0,20	4,30
038021P726CPTU748	44,8137	11,4160	1,00	0,20	1,80
038021P727CPTU750	44,8106	11,4230	1,00	0,20	0,20
038021P729CPTU754	44,8054	11,4080	3,00	0,20	2,60
038021P730CPTU756	44,8050	11,3665	1,00	0,20	1,50
038021P734CPTU764	44,8196	11,3947	1,00	0,20	0,00
038021P735CPTU766	44,7894	11,3644	1,00	0,20	0,90
038021P736CPTU768	44,7931	11,4165	1,00	0,20	4,50
038021P737CPTU770	44,8032	11,4034	3,00	0,20	8,00
038021P738CPTU772	44,8034	11,4076	3,00	0,20	4,20
038021P739CPTU774	44,8040	11,4061	3,00	0,20	4,80
038021P740CPTU776	44,8038	11,4060	3,00	0,20	5,40
038021P741CPTU778	44,8163	11,3536	1,00	0,20	0,60
038021P742CPTU780	44,7954	11,3754	1,00	0,20	2,10
038021P743CPTU782	44,8105	11,3920	1,00	0,20	0,30
038021P744CPTU784	44,7858	11,4069	1,00	0,20	2,90
038021P745CPTU786	44,8050	11,4074	3,00	0,20	2,90
038021P746CPTU788	44,8019	11,4105	1,00	0,20	4,50
038021P748CPTU792	44,8054	11,3988	1,00	0,20	2,10
038021P749CPTU794	44,8055	11,4085	3,00	0,20	6,00
038021P750CPTU796	44,8064	11,4129	3,00	0,20	4,10
038021P751CPTU798	44,8061	11,4100	3,00	0,20	4,70
038021P752CPTU800	44,8043	11,4064	3,00	0,20	5,20

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

038021P753CPTU802	44,8053	11,4077	3,00	0,20	2,10
038021P772CPTU828	44,7928	11,3728	1,00	0,20	3,10
038021P779CPTU836	44,7928	11,3887	3,00	0,20	4,20
038021P781CPTU839	44,7933	11,3879	3,00	0,20	7,20
038021P786CPTU845	44,7967	11,4004	3,00	0,20	3,50
038021P787CPTU847	44,7964	11,4003	3,00	0,20	2,80
038021P788CPTU849	44,7974	11,3987	3,00	0,20	10,10
038021P789CPTU850	44,7974	11,3989	3,00	0,20	8,50
038021P790CPTU851	44,7972	11,3993	3,00	0,20	12,10
038021P791CPTU852	44,7975	11,3996	3,00	0,20	10,80
038021P792CPTU853	44,7979	11,3992	3,00	0,20	8,90
038021P793CPTU855	44,7971	11,3997	3,00	0,20	8,70
038021P794CPTU856	44,7973	11,3999	3,00	0,20	4,50
038021P795CPTU858	44,7918	11,3695	1,00	0,20	1,00
038021P796CPTU860	44,7921	11,3715	1,00	0,20	1,00
038021P797CPTU861	44,7930	11,3719	1,00	0,20	0,00
038021P798CPTU862	44,7923	11,3683	1,00	0,20	0,60
038021P799CPTU863	44,7916	11,3738	1,00	0,20	4,30
038021P800CPTU864	44,7907	11,3730	1,00	0,20	6,10
038021P801CPTU865	44,7903	11,3720	1,00	0,20	2,40
038021P802CPTU866	44,7914	11,3746	1,00	0,20	2,50
038021P803CPTU867	44,7893	11,3700	1,00	0,20	0,70
038021P811CPTU879	44,8059	11,4121	3,00	0,20	7,90
038021P812CPTU881	44,8058	11,4125	3,00	0,20	6,20
038021P813CPTU882	44,8057	11,4114	3,00	0,20	3,60
038021P814CPTU883	44,8055	11,4116	3,00	0,20	2,20
038021P817CPTU888	44,7907	11,3806	3,00	0,20	2,50
038021P818CPTU890	44,7924	11,3824	3,00	0,20	5,50
038021P822CPTU896	44,8055	11,4117	3,00	0,20	4,10
038021P823CPTU898	44,8032	11,4091	3,00	0,20	6,50
038021P824CPTU899	44,8078	11,3641	1,00	0,20	5,50
038021P825CPTU901	44,8070	11,4109	3,00	0,20	1,10
038021P828CPTU906	44,7924	11,3514	1,00	0,20	2,00
038021P829CPTU907	44,7936	11,3520	1,00	0,20	1,60
038021P830CPTU908	44,7959	11,3574	1,00	0,20	0,50
038021P832CPTU910	44,8067	11,4041	1,00	0,20	4,30
038021P833CPTU912	44,8047	11,4065	3,00	0,20	5,60
038021P834CPTU913	44,8047	11,4065	3,00	0,20	4,80
038021P835CPTU914	44,8047	11,4066	3,00	0,20	5,10
038021P836CPTU915	44,8000	11,3647	1,00	0,20	3,10
038021P847CPTU926	44,8057	11,4098	3,00	0,20	5,70
038021P846CPTU925	44,8060	11,4094	3,00	0,20	6,00

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

038021P848CPTU928	44,8055	11,4099	3,00	0,20	10,80
038021P849CPTU929	44,8061	11,4101	3,00	0,20	5,50
038021P850CPTU931	44,8063	11,4098	3,00	0,20	4,10
038021P851CPTU932	44,8062	11,4104	3,00	0,20	5,90
038021P852CPTU934	44,8057	11,4104	3,00	0,20	7,80
038021P853CPTU935	44,8067	11,4119	3,00	0,20	9,50
038021P855CPTU938	44,8069	11,4103	3,00	0,20	6,10
038021P856CPTU939	44,8063	11,4110	3,00	0,20	10,40
038021P857CPTU940	44,8060	11,4112	3,00	0,20	6,80
038021P858CPTU941	44,8070	11,4117	3,00	0,20	2,50
038021P859CPTU942	44,8064	11,4121	3,00	0,20	7,30
038021P864CPTU947	44,7904	11,3857	1,00	0,20	1,30
038021P691CPTU702	44,7977	11,4130	1,00	0,20	2,90

Tabella 7-7 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTU. In tabella sono riportati anche i valori di Mw, PGA e soggiacenza di falda utilizzati per il calcolo di I_L per ciascuna delle verticali analizzate.

8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione degli elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica. Le nuove indagini geognostiche acquisite, gli attuali standard di rappresentazione ed archiviazione informatica nazionali e la direttiva regionale in materia di microzonazione sismica (D.G.R. 1227/2015), hanno reso necessaria una sostanziale revisione ed aggiornamento degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti studi di approfondimento di microzonazione sismica.

Per queste ragioni allo studio sono stati nuovamente allegati anche gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1). La Carta delle indagini, la Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica, la Carta delle frequenze naturali del terreno e la Carte della velocità delle onde di taglio sono state estese a tutto il territorio comunale, al fine di fornire una chiara e completa visione d'insieme di alcuni elementi base per gli approfondimenti di microzonazione, come la distribuzione delle indagini geognostiche disponibili, e l'andamento e l'estensione dei corpi geologici affioranti.

Negli altri elaborati invece sono stati caratterizzati solamente gli ambiti interessati dagli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Gli elaborati sono stati realizzati in scala 1:10.000, utilizzando come base cartografica la Carta Tecnica Regionale (CTR) 1:5.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

ELABORATO	RIFERIMENTO	SCALA
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{PGA}	Tavola 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,1 - 0,5 s}	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,5 - 1 s}	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,5 - 1,5 s}	Tavola 9	1:10.000

Tabella 8-1 - Elenco degli elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica.

8.1 Carta delle indagini (Tavola 1)

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (952) che quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello (9).

Nella cartografia a scala 1:10.000, le indagini sono raffigurate mediante simboli che ne identificano la tipologia in accordo con gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica – versione 4.0b – della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2015).

Attraverso l'utilizzo del metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) sono associati i simboli grafici delle diverse tipologie di prove in esso realizzate (es. prova penetrometrica statica con piezocono, sondaggio a distruzione ecc.). Il numero presente a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nello stesso sito. Utilizzando il metodo appena citato, il posizionamento dei simboli in cartografia avviene in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che per un sito ubicato in prossimità del limite amministrativo, il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del territorio comunale.

Si precisa inoltre che il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello. Per ulteriori dettagli in merito a provenienza, tipologia e qualità delle indagini riportate in carta, si rimanda al capitolo 4.

8.2 Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)

Nella Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica sono sintetizzate tutte le informazioni di base quali, geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche o geotecniche, derivate dalla revisione critica di studi, elaborati e cartografie disponibili.

In questa cartografia, a scala 1:10.000, sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici in grado di modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie o determinare eventuali effetti locali, oltre alla distribuzione dei terreni di copertura ed altre informazioni necessarie alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica. Non essendo presenti unità deposizionali affioranti o sub-affioranti riconducibili a substrato geologico, verranno in seguito esclusivamente descritte le forme di superficie e sepolte, i terreni di copertura e gli altri elementi geologici riportati in cartografia.

8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

Tra gli elementi funzionali alla definizione del modello di sottosuolo, sono stati riportati in carta tutti i pozzi e sondaggi disponibili, con i rispettivi valori di profondità rispetto alla superficie topografica.

Gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica prevedono che i pozzi ed i sondaggi vengano tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in colore rosso nel caso contrario. Come evidenzia la cartografia, nel territorio comunale di Sant'Agostino non sono presenti pozzi o sondaggi con profondità tali da poter raggiungere il substrato geologico.

In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica si precisa che, vista l'assenza di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta, tramite isobate, l'andamento della superficie considerata come tetto del bedrock sismico. Allo stesso modo, gli esigui dati freaticometrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità e quindi ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica.

Allo studio sono infine state allegate sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo, realizzate da e per il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1). Le due sezioni profonde (tracce A-A', C-C' - Tavola 2), estratte rispettivamente da "cartografia geologica nazionale, progetto CARG Foglio 203 Poggio Renatico" e "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli et al. 2017)", mostrano l'assetto stratigrafico delle principali unità litologiche riconosciute nel sottosuolo comunale. I rapporti geometrici e l'andamento dei corpi sedimentari

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave idrogeologica, in termini di gruppi acquiferi, sia in chiave più strettamente stratigrafica, mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi (v. Allegato 1).

L'altra sezione, più superficiale, (traccia B-B' - Tavola 2) mostra i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura, appartenenti all'intervallo stratigrafico considerato per la definizione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS). Questa sezione, realizzata a supporto degli studi post-sismici regionali, è stata ottenuta mediante correlazione di decine di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nella banca dati geognostica regionale.

8.2.2 Terreni di copertura

Nella parte affiorante delle unità di copertura sono state distinte quattro unità, ciascuna associata ad una classe prevista dagli standard di microzonazione. Oltre a queste è stata individuata una fascia contenente abbondanti riempimenti artificiali derivanti dallo scavo del Cavo Napoleonico. Quest'area è stata classificata come zona con "terreni contenenti resti di attività antropica (RI)". Le classi in seguito descritte sono state individuate sulla base del *Unified Soil Classification System (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985)*.

Questo sistema di classificazione dei terreni è applicabile alla maggioranza dei sedimenti non consolidati e frequentemente utilizzato sia in ambito ingegneristico che geologico. Le unità sono rappresentate in carta tramite colori e codici alfabetici, corrispondenti alle classi *U.S.C.S.* di rappresentazione e archiviazione geoinformatica. Il codice è formato da una prima parte maiuscola seguita da una minuscola (es. **SMes**), indicanti rispettivamente i caratteri litotecnici e quelli paleoambientali.

In base a questa classificazione sono state definite unità costituite da:

- **sedimenti sabbiosi di alveo (SMes)**

L'unità è costituita da sabbie medio fini con prevalenti sabbie fini limose passanti a limi sabbiosi e limi nelle porzioni sommitali più recenti. Questi sedimenti possono contenere intraclasti argillosi piatti, palle di fango corazzate, resti di legno e frammenti di laterizi. Le sabbie formano strati medio-sottili, con gradazione diretta e base erosiva, in cui sono evidenti laminazioni e strutture trattive (Caputo *et al.*, 2016). In superficie esse formano il corpo dossivo ad andamento planimetrico curvilineo poco pronunciato dell'antico alveo del Reno. Questo corpo mostra uno spessore medio di circa 8 m, ma può localmente raggiungere gli 11 metri.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Analoghi sedimenti costituiscono i depositi dell'alveo attivo del Reno ed il riempimento della cassa di espansione della Panfilia. Questa unità incorpora anche discontinui corpi plurimetrici di riporto antropico, come nei pressi della chiesa di San Carlo, che non sono stati cartograficamente distinti per ragioni di scala.

- **sedimenti di argine naturale (MLes)**

Sono formati da alternanze di limi inorganici, sabbie fini limose, limi argillosi a bassa plasticità. In questi depositi si possono talvolta osservare intraclasti di sedimenti fangosi, resti organici vegetali, o strutture sedimentarie da corrente trattiva come lamine parallele, inclinate o a gradazione diretta (Caputo *et al.*, 2016). Questi corpi, che derivano dalla coalescenza di ventagli da rotta, sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo. All'interno di questa unità sono stati inclusi i corpi limoso-argillosi degli argini artificiali qui costruiti a partire dal XVI secolo. Questi corpi sono frequentemente interrotti e rimaneggiati da eventi di rotta fluviale.

- **sedimenti fini di depressione interalvea (Olpi)**

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, depositi in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale. Questi sedimenti, principalmente coesivi, presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano un efficace livello di acquicludo superficiale.

- **argille organiche e torbe di palude (OHpi)**

L'unità è formata da argille, spesso assai plastiche, argille limose, argille organiche ricche di livelli torbosi. La frazione organica di origine vegetale è spesso abbondante. Si osservano talvolta resti di legno e foglie in eccellente stato di conservazione. Questi fanghi sono particolarmente frequenti in aree topograficamente depresse della piana interalvea del Reno. Questi sedimenti coesivi presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano, quindi, un efficace livello di acquicludo superficiale.

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

In questa tavola sono riportati i punti di misura di microtremore a stazione singola utilizzati per lo studio di microzonazione con i rispettivi valori di frequenza di risonanza fondamentale (f_0).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

I punti di misura riportati in carta sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 2.5 sono restituite con colori giallo, arancio e rosso, mentre il verde è utilizzato per valori inferiori a 2.

I differenti simboli grafici (cerchi e rombi) indicano rispettivamente le indagini realizzate da Geotema S.r.l. per lo studio di microzonazione sismica di terzo livello (cfr. Tavola 3) e quelle di repertorio acquisite da singoli professionisti o recuperate dagli archivi comunali (cfr. Tabella 4-1).

Nonostante l'inevitabile disomogeneità e il diverso grado di affidabilità delle numerose misure di rumore sismico ambientale raccolte, è stato comunque possibile identificare in modo sufficientemente chiaro le frequenze di vibrazione caratteristiche del territorio indagato. Di contro non è stato invece possibile procedere ad una suddivisione del territorio secondo le classi di frequenza proposte dall'allegato B della Delibera di Giunta Regionale D.G.R. 1227/2015. La frequenza fondamentale (f_0), infatti, mostra sempre valori inferiori ad 1 Hz che indicano fenomeni di risonanza dovuti a riflettori sismici posti ben al disotto dei 100 m di profondità.

Tutte le misure di microtremore analizzate mostrano sempre un **primo picco di frequenza** generalmente **compreso tra 0,60 e 0,85 Hz** con ampiezze variabili da 2 e 3. Un secondo picco a frequenze più basse è invece visibile esclusivamente dalle misure di lunga durata eseguite durante gli approfondimenti di terzo livello. Questo picco, verosimilmente **la f_0 , varia tra 0,3 e 0,35 Hz nella fascia meridionale del territorio** corrispondente alla **frazione di Dosso, per poi abbassarsi a frequenze di 0,25 - 0,2 Hz nelle aree** più settentrionali **di Sant'Agostino e San Carlo**. Stesso andamento mostrano le ampiezze del picco principale che diminuiscono procedendo dalle aree meridionali del territorio o quelle settentrionali.

La distribuzione dei valori di ampiezza e frequenza fondamentale ben evidenziano l'andamento dei maggiori contrasti d'impedenza nel sottosuolo e appaiono compatibili con le variazioni di profondità e tipologia di questi ultimi, indotte dall'evoluzione delle strutture tettoniche presenti nel territorio (v. paragrafo 6.2.).

8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4)

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) o carta delle aree suscettibili di effetti locali, è l'elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi di microzonazione.

Tra gli elaborati prodotti per i precedenti studi di microzonazione sismica, la carta delle microzone omogenee è quella che ha subito maggiori modifiche. Tali revisioni si sono rese necessarie sia per adeguare l'elaborato cartografico agli standard di rappresentazione e archiviazione informatica della Commissione

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Tecnica Nazionale, sia a fronte della disponibilità di molte nuove indagini realizzate per la ricostruzione post-sismica e altre supporto degli approfondimenti di terzo livello di microzonazione (capitolo 4).

L'elaborato, realizzato alla scala 1:10.000, mostra la suddivisione del territorio comunale in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità**, in quanto non sono presenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate anche le ubicazioni dei punti di misura di rumore ambientale (v. Tavola 3, paragrafo 8.3) e le forme di superficie e sepolte presenti nel territorio (v. Tavola 2, paragrafo 8.2), come richiesto dagli standard di rappresentazione già citati.

Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo Figura 8-1 e ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte come previsto dagli standard sopra citati.

Le 3 zone cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione** (ZA_{LQ}) e rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. E' stata inoltre identificata una microzona **suscettibile di sola amplificazione locale** a cui è stato attribuito il codice 2004. Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi Figura 8-1 con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

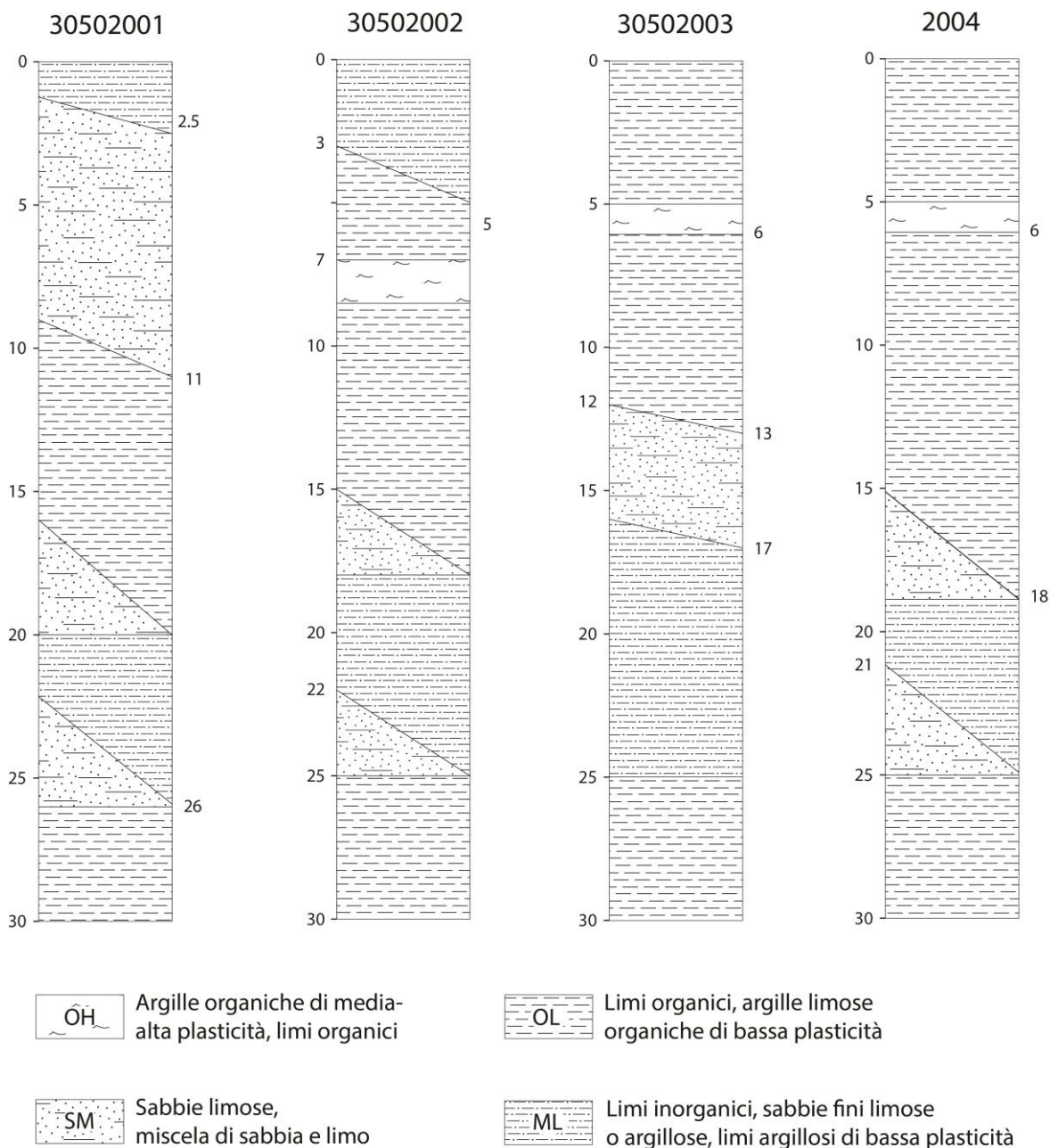


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

Zona 30502001

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate dello spessore massimo di 11 metri, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e subordinatamente torbose. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, con intercalazioni di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

sabbie organizzate in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 – 4 m. I corpi sabbiosi sono esclusivamente presenti al disotto dei 15 metri di profondità.

Zona 30502002

Limi inorganici e sabbie fini limose, poggiano su argille limose organiche con importanti livelli di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, con intercalazioni di sabbie organizzate in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 – 4 m. I corpi sabbiosi sono esclusivamente presenti al disotto dei 15 metri di profondità.

Zona 30502003

Argille organiche di bassa plasticità con intercalazioni limose e livelli di torbe poggiano su un corpo lenticolare di sabbie poco addensate dello spessore di 4-5 metri. Oltre i 15 metri si rinvencono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità.

Zona 2004

Argille organiche di bassa plasticità con intercalazioni limose e livelli di torbe poggiano su limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con intercalazioni di sabbie organizzate in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 – 4 m. I corpi sabbiosi sono esclusivamente presenti al disotto dei 15 metri di profondità.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i **94 punti di misura di Vs utilizzati per lo studio di microzonazione sismica** ed i rispettivi valori di V_{s30} .

I valori di V_{s30} sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati di velocità acquisiti mediante misure geofisiche di tipo diretto e indiretto (Tabella 8-2). Le differenti tipologie di indagini sono rappresentate in cartografia mediante simboli grafici distinti, rispondenti agli standard di rappresentazione utilizzati per lo studio e già ampiamente citati.

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPT	72	MASW	19
DH	2	-	-
CH	1	-	-

Tabella 8-2 - Numero di indagini, suddivise per tipologia, utilizzate per la redazione della carta delle velocità delle onde di taglio.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Osservando le V_{s30} si nota come le indagini indirette forniscano generalmente valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure di V_s dirette tipo cono sismico (SCPT), down-hole (DH) o cross-hole (CH).

La distribuzione e l'andamento dei **valori di V_{s30} , generalmente inferiori a 200 m/s**, sono coerenti con quelli di terreni analoghi che formano il primo sottosuolo di gran parte della bassa pianura alluvionale emiliano-romagnola.

8.6 Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9)

Le carte di microzonazione sismica di livello 3, o carte dei fattori di amplificazione delle aree, sono state realizzate in accordo con quanto previsto dall'Allegato C della D.G.R. n. 1227/2015 e dagli Standard MS 4.0b e rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studio di microzonazione.

Gli elaborati in scala 1:10.000, riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici (FA) espressi in termini di accelerazione di picco al suolo e di intensità di Housner¹ per i diversi periodi di vibrazione previsti dagli indirizzi regionali dell'Emilia-Romagna (D.G.R. 2193/2015):

- FA_{PGA} (Tavola 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA_0);
- $FA_{0,1-0,5s}$ (Tavola 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,5-1s}$ (Tavola 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.
- $FA_{0,5-1,5s}$ (Tavola 9) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3, Tabella 8-4) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1). Le analisi sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche delle microzone individuate e dell'assetto tettonico del territorio, che può essere schematicamente suddiviso in due macro aree strutturalmente omogenee. I coefficienti ottenuti dalle modellazioni numeriche eseguite nelle due macro aree (Tabella 8-3, Tabella 8-4) sono stati confrontati con

¹ L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia dissipata nelle strutture durante un terremoto.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

quelli proposti dagli abachi regionali (v. paragrafo 7.1.1). La sostanziale coerenza e compatibilità riscontrata ha fornito una validazione dei modelli utilizzati per la risposta sismica locale e ha permesso di caratterizzare le macro aree con i rispettivi fattori di amplificazione, calcolati per diversi periodi di vibrazione.

$F_{A_{PGA}}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,34	1,34	2,46	2,85

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro-settentrionale del territorio comunale comprendente Sant'Agostino e San Carlo.

$F_{A_{PGA}}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,51	1,82	2,66	2,73

Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale comprendente Dosso

Le zone suscettibili di instabilità per liquefazione sono distinte da quelle soggette a sola amplificazione locale per mezzo di soprassegno cartografico.

Dalle geometrie delle "Zone di attenzione per liquefazione" rappresentate nella carta MOPS (v. Tavola 4, paragrafo 8.4), sono state derivate quelle delle "Zone di suscettibilità per liquefazione". Queste ultime sono state suddivise per classi di rischio sulla base degli indici del potenziale di liquefazione (I_L) ottenuti da analisi semplificate eseguite su prove penetrometriche a piezocono (CPTu). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l'utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$) e elevato ($5 < I_L \leq 15$). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione nazionale non prevedono che le aree a basso rischio ($2 < I_L$) vengano rappresentate in carta con il retino che contraddistingue le zone instabili per liquefazione.

Rispetto a quanto previsto dagli Standard MS 4.0b, nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata l'elevata disponibilità di prove elettriche e il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto opportuno non riportare in carta indici derivati da precedenti verifiche effettuate su prove meccaniche. I valori di I_L ottenuti sono esplicitati mediante etichette numeriche associate a simboli quadrati con colorazioni distinte a seconda del grado di rischio. I simboli bianchi indicano rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), quelli gialli moderato ($2 < I_L \leq 5$) ed i rossi elevato ($5 < I_L \leq 15$).

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livello eseguiti per lo studio di microzonazione sismica hanno permesso di determinare l'amplificazione sismica attesa e quantificare il grado di rischio nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

L'amplificazione attesa è stata determinata mediante analisi numeriche di risposta sismica locale, basate su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio (V_s) acquisiti in foro sino ad elevate profondità. Le modellazioni e le analisi di risposta sismica locale eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), ma non possono in alcun modo sostituirle. Specifiche analisi di risposta sismica locale devono infatti essere eseguite tenendo conto delle caratteristiche geologico-geotecniche del sito ed in funzione della tipologia del progetto da realizzare, in accordo con le suddette Norme Tecniche. Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, inoltre, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, è stato considerato come maggiormente cautelativo ed affidabile per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi riassuntiva dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell'area ed una analisi di come questi ultimi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio liquefazione e insediamento antropico. Infine vengono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate.

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale (Figura 9-1), depositi durante fasi dell'ultima glaciazione.

In gran parte del territorio comunale questi depositi sono costituiti da alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con V_s comprese tra 200 e 250 m/sec. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta nella parte centro-settentrionale dell'area a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

Nei pressi del confine settentrionale dell'area di studio i depositi pleistocenici singlaciali sono, invece, formati da estesi corpi di sabbie grossolane del Po con V_s anche superiori ai 300 m/s.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, i sedimenti descritti del Pleistocene terminale sono inquadrati nella parte superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES7).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Analogamente ai sedimenti più antichi, anche gran parte dei **sedimenti post-glaciali** sono costituiti da prevalenti limi di provenienza appenninica, con intercalazioni di corpi di sabbie di canale fluviale e argille di piana interalvea (Figura 9-1). Sono presenti livelli di paleosuoli a concrezioni carbonatiche nei quali l'alterazione diagenetica influenza notevolmente i parametri geotecnici e geofisici. Le velocità sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s, con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti.

Nei pressi del confine settentrionale dell'area di studio, invece, la successione limosa si assottiglia notevolmente e spessi corpi di sabbie di meandro di Po possono saldarsi direttamente a quelle singlaciali. I sedimenti post-glaciali descritti costituiscono la porzione inferiore del Subsistema di Ravenna (AES8). **I sedimenti più recenti**, deposti negli ultimi 5.000 anni, sono infine dominati da fanghi argillosi organici di origine appenninica con frequenti orizzonti di torbe (Figura 9-1) di ambienti di palude continentale. Questi depositi coesivi presentano scarse proprietà geotecniche e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi inferiori a 100 m/s.

Le ampie paludi furono attraversate da varie generazioni di canali fluviali di Reno, che hanno deposto importanti corpi allungati di sabbie, sabbie limose e limi di riempimento di canale, fiancheggiati estesi argini limoso-sabbiosi. Particolarmente evidente è il corpo di paleoalveo di Reno su cui si sono sviluppati gli abitati di Sant'Agostino e San Carlo.

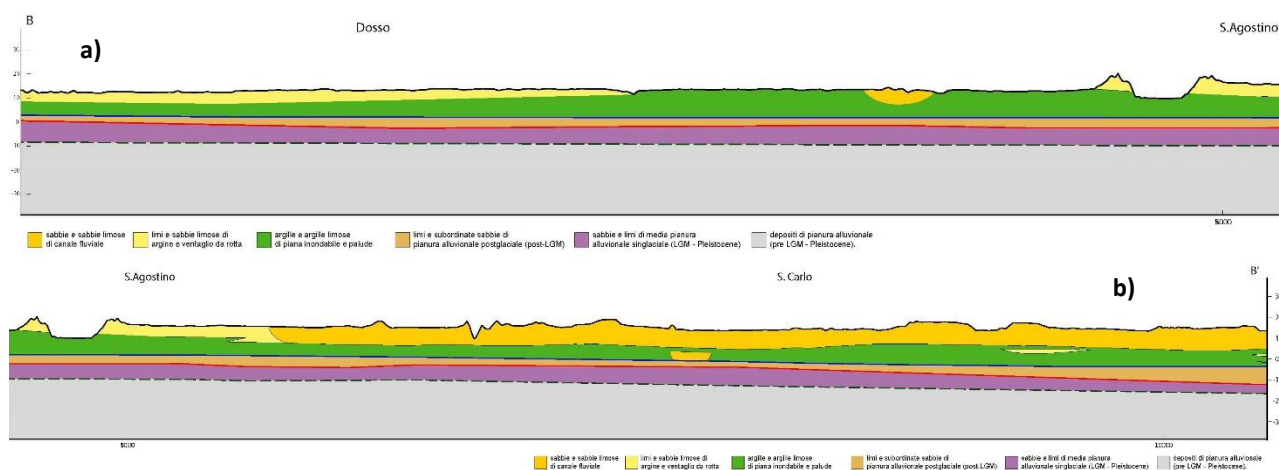


Figura 9-1 - Estratti dalla sezione geologica superficiale B-B' (v. Allegato 1). Gli estratti mostrano i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura. a) Dosso-Sant'Agostino - b) Sant'Agostino-San Carlo.

9.2 Microzonazione sismica e criticità

Sulla base delle nuove conoscenze acquisite mediante gli approfondimenti di terzo livello, **il territorio indagato è stato suddiviso in due distinte aree a diversa pericolosità sismica locale**, in base ai differenti valori di amplificazione ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale. Tali aree riflettono la distribuzione delle diverse strutture tettoniche e l'assetto stratigrafico del sottosuolo:

a) la **parte meridionale del territorio** comunale, caratterizzata dall'alto strutturale corrispondente alla prosecuzione orientale della piega anticlinale di Mirandola. La presenza della struttura tettonica ha determinato il sollevamento delle unità torbiditiche plioceniche, corrispondenti al substrato sismico, sino a ridotte profondità inferiori a 300 m.

In quest'area i terreni di coperta sono perciò meno spessi e dominati da depositi continentali di pianura alluvionale di provenienza appenninica a cui si intercalano, nella parte inferiore, depositi di fronte deltizia e marino marginale ad alimentazione padana. Le coperture quaternarie sono quindi in larga parte costituite di depositi argilloso-limosi alternati a subordinati corpi sabbiosi di alveo.

Questa porzione di territorio, in cui si sviluppano gli ambiti urbani di Dosso e della propria area industriale, è caratterizzata dai più elevati fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,23 g**.

b) la **porzione centro-settentrionale** del territorio comunale interessata dalla presenza di una sinclinale compresa nelle pieghe ferraresi. L'elevata subsidenza, la notevole disponibilità di spazio di accomodamento sedimentario ed i forti apporti terrigeni, hanno qui determinato una spessa successione di coperture sedimentarie. Le successioni quaternarie sono inferiormente dominate da fanghi marini di prodelta e sabbie di fronte deltizio padano a cui si sovrappongono depositi continentali ricchi di apporti di Po e superiormente di Reno ed altri fiumi appenninici. Questa porzione di territorio in cui si sviluppano gli ambiti urbani di Sant'Agostino e San Carlo è caratterizzata da minori fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,20 g**.

Una simile bipartizione del territorio comunale era già stata proposta negli studi di microzonazione sismica realizzati dalla Regione Emilia-Romagna in seguito agli eventi del 2012.

Rispetto agli studi precedenti (cfr. Ordinanza 70/2012), l'estensione delle diverse fasce è stata modificata estendendo assialmente verso sud-est quella meridionale, caratterizzata da substrato sismico relativamente poco profondo e corrispondente all'area di anticlinale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Allo stesso modo sono stati rivisti i coefficienti di amplificazione ed i valori di **accelerazione** di picco (PGA) che risultano inferiori a quelli proposti nel suddetto studio, passando rispettivamente da 1,5 ad 1,3 per l'area settentrionale di sinclinale e da 1,7 a 1,5 per l'area di anticlinale. La rimodulazione dei fattori è stata dettata dai risultati delle risposte sismiche locali, che risultano d'altra parte coerenti con quelli proposti dagli abachi regionali introdotti con la D.G.R. 2193/2015.

Per il **calcolo del potenziale di liquefazione** delle diverse aree indagate sono stati utilizzati i rispettivi valori di PGA (*Peak Ground Acceleration*) ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale (cfr. 7.1.1e 7.2.1).

Gli indici di liquefazione (I_L) sono stato calcolati utilizzando il metodo semplificato di Boulanger e Idriss (2014) per ogni sito caratterizzato mediante indagine CPTu.

La distribuzione degli indici di liquefazione evidenzia come le **fasce a maggior rischio** siano collocate in **corrispondenza dei paleoalvei o dei corpi da rotta fluviale** sub-affioranti. Queste fasce, formate da sabbie e limi poco addensati di riempimento di canale, argine e ventaglio da rotta (MOPS 30502001, 30502002 e 30502003), mostrano potenziali di liquefazione variabili da moderati ($<2 I_L <5$) ad alti ($<5 I_L <15$).

Questa correlazione trova riscontro nei diffusi effetti di liquefazione osservati nel 2012 negli abitati di Sant'Agostino e San Carlo, che si sviluppano sopra un corpo dossivo di paleoalveo del Reno. I gradienti topografici del dosso fluviale aggravano i rischi connessi alla liquefazione, favorendo l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismico, come ampiamente verificato nel 2012 nelle località di San Carlo e Mirabello.

Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli ($I_L <2$) caratterizzando invece le **aree topograficamente più depresse del territorio comunale**, che non presentano significativi corpi di sabbie nei primi 20 m di sottosuolo, in quanto essenzialmente formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, depositi in condizione di palude e depressione interalvea (MOPS 2004).

Le **aree a minor rischio** coincidono, quindi, spesso con le **aree rurali** scarsamente abitate del territorio comunale. Fasce classificate a **rischio liquefazione non significativo** ($I_L <2$) interessano solo **parte dell'abitato di Dosso** e una **porzione marginale sud-orientale di quello di Sant'Agostino**.

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative al grado di rischio liquefazione nell'area di studio.

Raffronti con i preesistenti studi di microzonazione sismica risultano alquanto complessi sia per il numero limitato di verticali precedentemente analizzate, sia per l'utilizzo di differenti metodi semplificati per la stima del potenziale di liquefazione. A questo si deve inoltre aggiunge la riduzione delle accelerazioni di picco utilizzate per il calcolo degli indici di liquefazione, dettata dai risultati delle risposte sismiche locali e peraltro suggerita dai nuovi abachi regionali (D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Gli approfondimenti di terzo livello hanno, infine, permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e delle velocità delle onde di taglio (V_s) acquisite in foro sino ad elevate profondità (Minarelli *et. al.* 2016). Tali misure, correlate con i dati stratigrafici utilizzati per la definizione della sezione Cento - Occhiobello (Allegato 1, sezione C-C'), hanno permesso di porre il substrato sismico in corrispondenza del tetto dei depositi torbiditici di età Pliocenica.

Questa superficie si trova sepolta a profondità assai variabili, con quote inferiori ai 300 metri nella fascia meridionale del territorio comunale e profondità di circa 700 metri in quella centro-settentrionale.

Tale condizione è stata determinata dalla deformazione tettonica che dal Pliocene ha condizionato l'evoluzione di questo settore della Pianura Padana.

9.3 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nel territorio in esame emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato storico e le zone a più elevato potenziale di liquefazione.

Questa infelice correlazione non è casuale ed interessa gran parte dei centri abitati e nuclei storici della bassa Pianura Padano-Veneta, in quanto i fattori che hanno controllato la nucleazione e lo sviluppo degli insediamenti sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili. In questi vasti territori di bassa pianura i limitati gradienti morfologici e gli alvei fluviali naturalmente pensili rendono lo scolo delle acque molto difficoltoso, particolarmente nelle aree più subsidenti. La diffusione storica di aree umide, paludi e acquitrini ha, quindi, fortemente limitato le possibilità di sviluppo agricolo ed insediativo.

In questo contesto i corpi arginali e i dossi sabbiosi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente emerse e drenate, percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva il tracciamento di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi hanno rappresentato, storicamente, importanti vie di trasporto fluviale. La presenza di falda libera all'interno dei corpi acquiferi freatici consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi superficiali, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante coltivabili anche nei periodi siccitosi. La combinazione di questi fattori ha fatto sì che i centri antichi si enucleassero nella quasi totalità dei casi su corpi sabbiosi di alveo e argine fluviale.

A seguito delle diffuse bonifiche idrauliche e allo sviluppo economico e tecnologico in epoca più recente, questi condizionamenti territoriali si sono fortemente ridotti, anche se la correlazione fra zone sabbiose liquefacibili e insediamento permane. Infatti le zone morfologicamente depresse con sedimenti fangoso-torbosi presentano scarse caratteristiche geotecniche e gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

9.4 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

Le norme regionali in materia urbanistica e di riduzione del rischio sismico prevedono che le risultanze degli studi della microzonazione debbano essere recepite negli strumenti di pianificazione territoriale (es. previgenti PSC o redigenti PUG), predisponendo cartografie e norme di piano che contengano indicazioni ed indirizzi per la riduzione del rischio sismico.

In base alle principali criticità emerse dallo studio di microzonazione sismica di terzo livello, si indicano in sintesi le analisi e gli approfondimenti ritenuti necessari per studi geologici da realizzarsi a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (es. nuovi accordi operativi o PUA) e in fase esecutiva di progetti e opere.

L'analisi delle numerose indagini raccolte per lo studio di microzonazione ha evidenziato come la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi risulti principalmente distribuita lungo la direttrice del attuale corso del fiume Reno e quella del suo antico alveo che attraversa gli abitati di Sant'Agostino e San Carlo.

Altri livelli liquefacibili sono legati alla presenza di canali e ventagli da rotta o alla presenza di palealvei sepolti.

L'evoluzione del reticolo idrografico del fiume Reno, avvenuta nel tempo attraverso rotte, avulsioni e divagazioni, ha infatti determinato ad una distribuzione estremamente eterogenea dei litotipi alluvionali, che nel sottosuolo formano un complesso intreccio di corpi sabbiosi. La definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione e delle diverse classi di rischio, presenta quindi inevitabili incertezze legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, nonostante il numero elevato di indagini presenti nel territorio. L'incertezza diviene maggiore laddove non si disponga di dati stratigrafici attendibili o adeguatamente distribuiti.

Per tali ragioni su tutto il territorio comunale si raccomanda l'esecuzione di specifici approfondimenti volti ad accertare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili, mediante adeguate campagne di indagini geotecniche che comprendano prove penetrometriche con punta elettrica, preferibilmente a piezocono, spinte almeno sino a 20 metri di profondità. Tali indagini garantiscono infatti un'affidabile valutazione del potenziale di liquefazione e una quantificazione dei cedimenti indotti.

Il calcolo dell'indice di potenziale di liquefazione (I_L) dovrà tenere conto dei metodi e dei parametri di input utilizzati per lo studio di microzonazione (paragrafo 7.2.1). Scelte meno cautelative dovranno essere adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche e supportate da metodi di analisi avanzati (es. prove di laboratorio) e approfondite indagini sul contesto idrogeologico locale e sulle soggiacenze minime dei livelli di falda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

Nelle aree a maggior rischio si ritiene opportuno realizzare quindi sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Queste prove dovranno considerarsi indispensabili qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi i cui fusi granulometrici rientrino nelle fasce di possibile liquefazione, o in caso di interventi edilizi strategici o comunque rilevanti previsti dalla pianificazione urbanistica.

Tuttavia, anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono sempre da considerarsi rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. Estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree contigue può risultare alquanto incerto e pertanto è altamente consigliabile prevedere indagini di tipologia e numero adeguate all'ampiezza dell'area considerata e alla rilevanza delle opere.

Si ricorda inoltre che le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 prediligono l'utilizzo di **analisi di risposta sismica locale** per la definizione dell'azione sismica, rispetto all'approccio semplificato basato sulle categorie di sottosuolo. Nelle aree caratterizzate dalla presenza di terreni potenzialmente liquefacibili questa scelta risulta ancor più opportuna e pertanto si consiglia di procedere con specifiche analisi di risposta sismica locale.

Si precisa inoltre che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle Norme Tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle. Le analisi di risposta sismica finalizzate alla definizione dell'azione sismica di progetto devono essere, infatti, realizzate sulla base di dati geologici, geotecnici e geofisici acquisiti nel sito d'interesse ed in funzione delle caratteristiche e della classe d'uso dell'opera da realizzare.

Infine anche nelle aree con presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche particolarmente scadenti (bassi valori di C_u e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2002 e 2004 (Figura 8-1 - Tavola 4) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geotecniche in sito e di laboratorio, per la valutazione e quantificazione di possibili cedimenti indotti.

10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <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.
- Albarelo D., 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, a. XXVIII, n. 2.
- Amorosi A., (1997a): *Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research*. *Sedimentary Geology*, 109: 135-153.
- Amorosi A., (1997b): *Miocene shallow-water deposits of the northern Apennines: A stratigraphic marker across a dominantly turbidite foreland-basin succession*. *Geologie en Mijnbouw*, v. 75, p. 295-307.
- Amoroso S., Monaco P., Lehane B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. *Soils and Rocks*, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- ASTM, (1985): *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards*, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): *Structural model of Italy - Sheet n°1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), *Structural model of Italy*. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., Martelli L., (a cura di) (2004): *Carta Sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, Scala 1:250.000 e Note Illustrative*. SELCA, Firenze.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. and Vannucci G., (2004): *Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250000*. Regione Emilia-Romagna – CNR.
- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012): *Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies*. *Ann. Geophys.* 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- Boulangier R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, *Annals of Geophys.*, 46 (5), 865-882.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. *Annals of Geophys.*, 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant'Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. *Nat. Haz. Earth System Sciences*, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara - Geotema S.r.l. (2016), <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.
- 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 Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf.
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.
- D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.
- Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230–241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. *Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112*.
- Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.
- Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.
- Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- DISS Working Group, (2015): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.
- Emergeo Working Group, (2012): *Technologies and new approaches used by the INGV EMERGEO Working Group for real-time data sourcing and processing during the Emilia Romagna (northern Italy) 2012 earthquake sequence*. ANNALS OF GEOPHYSICS, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6117.
- Emergeo Working Group, (2013): *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a): *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H., (2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. Tectonophysics, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom.
http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA;
<http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*.
<http://iside.rm.ingv.it>.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- 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., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F., Severi P., (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, edizione 2016*.
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiari C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- Mascandola C., Massa M., Barani S., Lovati S., Santulin M., (2017): *Long-Period Amplification in Deep Alluvial Basins and Consequences for Site-Specific Probabilistic Seismic-Hazard Analysis: An Example from the Po Plain (Northern Italy)*. Bulletin of the Seismological Society of America 107 (2): 770-786. <https://doi.org/10.1785/0120160166>.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V., (2019): *Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring*. Bulletin of the Seismological Society of America 109 (1): 164-177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>.
- Meletti C., 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.
- Milana, G., P. Bordonì, F. Cara (2014). *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 2195; doi:10.1007/s10518-013-9483-y.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. Annals of Geophysics, 2016.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunidei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*, Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (11) pp. 3187-3206.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

- Petronio L., Affatato A., Baradello L., Barbagallo A., Cristofano G., Sorgo D., Lai C.G., Poggi V., (2018): *Shear wave seismic reflection survey in the 2012 Emilia epicentral are*. Atti 37° Convegno Nazionale GNGTS, Sezione 2.2. Bologna.
- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., **55**(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., (1986): *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*, in: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), *Foreland basins*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). *Guida alla Geologia del margine appenninico-padano* Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K., (2009): *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, June 2009
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**, 4, pp. 550-555.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI SANT'AGOSTINO

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

Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.

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., 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, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico - Tecnica per la Microzonazione Sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali del terreno	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 6 - FA_{PGA}	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 7 - $FA_{0,1-0,5s}$	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - $FA_{0,5-1,0s}$	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - $FA_{0,5-1,5s}$	1:10.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU