



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 Mirandola



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	02/05/2018

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.....	11
2.2	Sorgenti sismogenetiche.....	16
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	18
3.1	Assetto strutturale	18
3.2	Contesto geomorfologico.....	20
3.3	Contesto geologico e stratigrafico	22
4	Dati geognostici e geofisici.....	25
4.1	Indagini di repertorio.....	25
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	27
4.2.1	Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)	27
4.2.2	Misure di microtremore a stazione singola (HVSr).....	28
5	Modello del sottosuolo	30
5.1	Substrato.....	32
5.2	Terreni di copertura	33
5.2.1	Quaternario Marino	33
5.2.2	Quaternario continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo).....	34
5.2.3	Considerazioni conclusive.....	36
6	Interpretazioni e incertezze	37
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0)	37
6.2	Substrato rigido.....	39
6.2.1	Zona sud di Mirandola e frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni.....	40
6.2.2	Zona centro-nord di Mirandola e altre frazioni	42
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione	44
7	Metodologie di elaborazione e risultati	46
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali.....	46
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche	47
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	60
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione.....	60
8	Elaborati cartografici	67

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

8.1	Carta delle indagini (Tavola 1)	67
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)	68
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	68
8.2.2	Terreni di copertura	69
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	70
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4)	70
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	73
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8 e 9).....	74
9	Commenti finali e criticità.....	76
9.1	Sintesi dei risultati della microzonazione sismica.....	76
10	Bibliografia.....	79
11	Allegati	85

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

<i>Coordinamento dello studio di Microzonazione Sismica:</i>	dott. Luca Minarelli
<i>Redazione della relazione:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Gabriele Tarabusi
<i>Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Andrea Pavanati dott. Matteo Fusetti dott. Gabriele Tarabusi
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Gabriele Tarabusi dott. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione dei dati stratigrafici:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Gabriele Tarabusi
<i>Esecuzione ed elaborazione indagini geognostiche:</i>	Geostudio Calzolari (MN)
<i>Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:</i>	dott. Luca Minarelli

1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Mirandola inizia nel 2011/2012 con la realizzazione, da parte dello Studio di Geologia Tarabusi, della microzonazione di secondo livello, finanziata con i contributi previsti dalla DGR 1051/2011 di cui all'OPCM 3907/2010 (Tarabusi, 2012).

Successivamente, a seguito della sequenza sismica emiliana del maggio 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013).

Nei primi mesi del 2015, nell'ambito delle procedure per la redazione del nuovo Piano Strutturale Comunale (PSC), sono stati realizzati specifici approfondimenti geologici e di microzonazione sismica di terzo livello per le 10 nuove aree di espansione previste dal piano (Tarabusi, 2015).

Con la determina n° 8757 del 5/6/2017 del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna sono stati infine attribuiti al Comune di Mirandola i contributi (di cui all'OCDPC 344/2016) per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica di terzo livello e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (C.L.E.).

Questa fase conclusiva del percorso di microzonazione fornisce l'occasione per uniformare anche i contenuti dei precedenti studi agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) e agli attuali "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" recentemente aggiornati dalla 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 Mirandola è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 2188/2016 dal titolo "Approvazione dei criteri, delle linee guida e delle indicazioni tecniche e procedurali per la presentazione dei progetti e l'attribuzione dei 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" e con specifico riferimento ai criteri e alle specifiche tecniche riportati nell'OCDPC 344/2016.

Per quanto non specificato nei suddetti documenti, 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 MIRANDOLA

- “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”;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico” (L.R. 19/2008);
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” (NTC, 2008);
- 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 questo specifico studio si individua nella creazione di uno strumento per la 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; in particolare, lo studio di terzo livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili.

Nel contesto 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.

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 e 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 dal presente studio di microzonazione sismica di terzo livello sono quelli individuati secondo i criteri sopra indicati dal PSC del Comune di Mirandola, con l'aggiunta di un'area buffer di raggio variabile tra i 50 e i 100 metri.

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;
- 2 Sezioni geologiche;
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Relazione illustrativa;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato A2 della D.G.R. 2188/2016 dal titolo "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 344/2016 e Decreto del Capo Dipartimento della Protezione Civile del 21 giugno 2016".

Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile dal titolo "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 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 of Individual Seismogenic Sources (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;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2016; <http://cnt.rm.ingv.it/iside>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relativi ai terremoti avvenuti dal 1985 ad oggi;
- il CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni *et al.*, 2018; <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>), 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 ad effetti locali

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;

- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (Gruppo di lavoro MPS, 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 Comune di Mirandola 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.

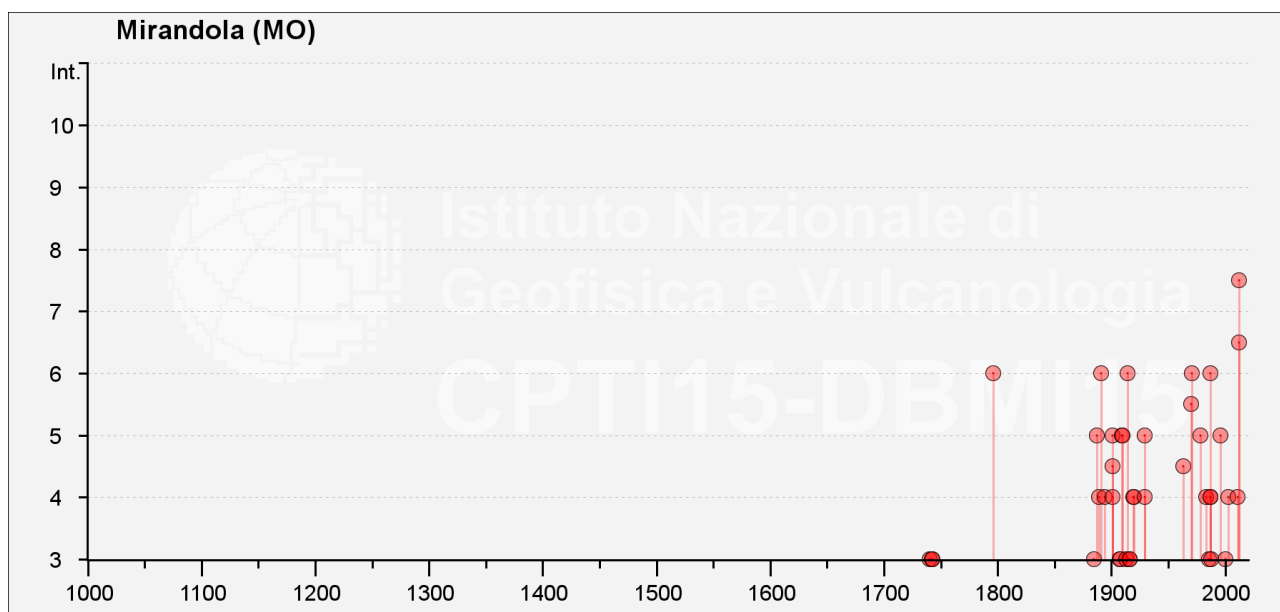
In relazione al Comune di Mirandola il database contiene 52 record relativi ad eventi sismici storici; data l’ampia mole di dati presenti, si è deciso di prendere in considerazione solamente quelli riportanti intensità macrosismiche IMCS ≥ 5 (Tabella 2-1 e Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono stati 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.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	I_0	M_w	IMCS MIRANDOLA
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1796	10	22	04			Emilia orientale	27	7	5.45	6
1887	02	23	05	21	50.00	Liguria occidentale	1511	9	6.27	5
1889	03	08	02	57	04.00	Bolognese	38	5	4.53	4
1891	06	07	01	06	14.00	Valle d'Ilasi	403	8-9	5.87	6
1894	11	27	05	07		Bresciano	183	6	4.89	4
1901	01	20	06	30		Bassa modenese	10	4	3.68	4

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

1901	01	20	06	34	20.00	Bassa modenese	12	5	4.11	5
1901	10	30	14	49	58.00	Garda occidentale	289	7-8	5.44	4-5
1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36	5
1910	03	22	23	29		Bassa modenese	15	5	4.16	5
1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63	6
1919	06	29	15	06	13.00	Mugello	565	10	6.38	4
1920	09	07	05	55	40.00	Garfagnana	750	10	6.53	4
1929	04	19	04	16		Bolognese	82	6-7	5.13	5
1929	04	22	08	26		Bolognese	41	6-7	5.1	4
1963	04	05	13	49	42.00	Finale Emilia	6	4-5	3.93	4-5
1970	11	02	08	42	12.00	Bassa modenese	3	4-5	3.93	5-6
1971	07	15	01	33	23.00	Parmense	228	8	5.51	6
1978	12	25	22	53	41.00	Bassa modenese	28	5	4.39	5
1983	11	09	16	29	52.00	Parmense	850	6-7	5.04	4
1987	04	24	02	30	27.04	Reggiano	54	6	4.64	4
1987	05	02	20	43	53.32	Reggiano	802	6	4.71	6
1987	05	08	11	10	27.88	Bassa modenese	24	6	4.44	4
1996	10	15	09	55	59.95	Pianura emiliana	135	7	5.38	5
2003	09	14	21	42	53.18	Appennino bolognese	133	6	5.24	4
2011	07	17	18	30	27.31	Pianura lombardo-veneta	73	5	4.79	4
2012	05	20	02	03	50.17	Pianura emiliana	53	7	6.09	6-7
2012	05	29	07	00	02.88	Pianura emiliana	87	7-8	5.9	7-8

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Mirandola, in occasione dei principali eventi, tratti dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica attribuite al Comune di Mirandola, dall'anno 1000 al 2012, 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 fumaioli, lesioni negli edifici.
VIII	Rovinoso	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.

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

Come è possibile notate 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 VI-VII e di VII-VIII grado.

Valori pari al VI grado sono stati osservati anche con i terremoti del 1987 del Reggiano, del 1971 del Parmense, del 1914 della Lucchesia, del 1891 della Valle dell'Illasi e del 1796 dell'Emilia Orientale.

Per tre di questi eventi sono disponibili le informazioni dettagliate degli studi del CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), che riportano indicazioni sugli effetti verificatisi a Mirandola:

15 luglio 1971 - VI MCS - *La scossa fu forte e causò alcune lesioni in edifici colonici di vecchia costruzione.*

7 giugno 1871 - VI MCS - *Il terremoto fu forte e causò caduta di tegole e camini, distacco di pezzi di intonaco vecchio e spostamento di mobili.*

22 ottobre 1796 - VI MCS - *La scossa fu violenta: causò la caduta di 24 comignoli e una piccola lesione alla volta sopra l'altare maggiore della chiesa di S. Francesco.*

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (Gruppo di lavoro MPS, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,125 - 0,150 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-2).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

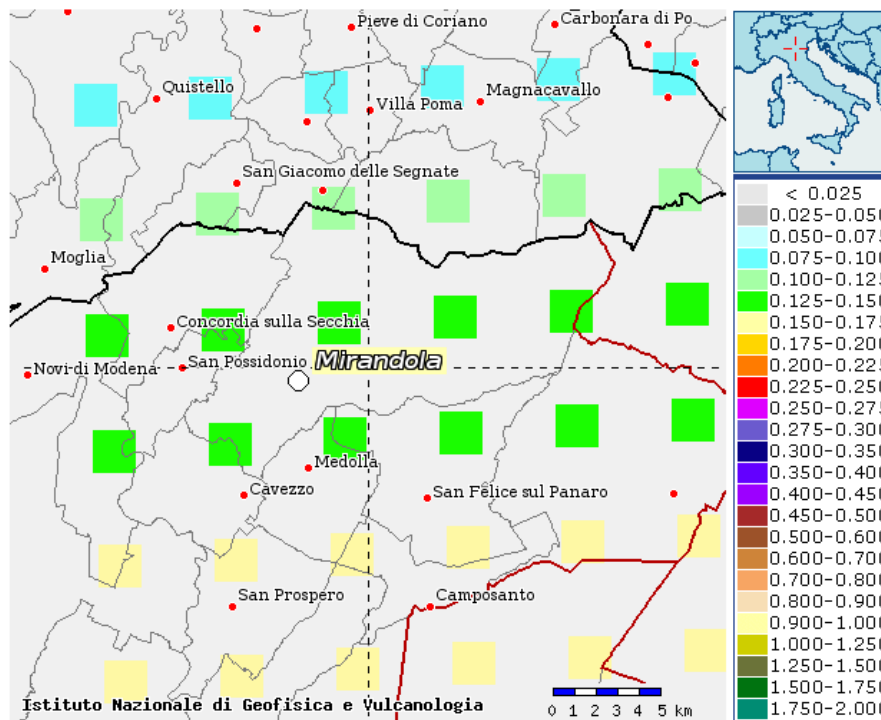


Figura 2-2 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

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 e magnitudo momento M_w pari a 6.1, 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), mentre la seconda, di M_L pari a 5.8 e M_w pari a 5.9, 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) (Pondrelli *et al.*, 2012; Massa *et al.*, 2012; Figura 2-3).

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 2-3), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1,5$ (Figura 2-3).

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghe 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 MIRANDOLA

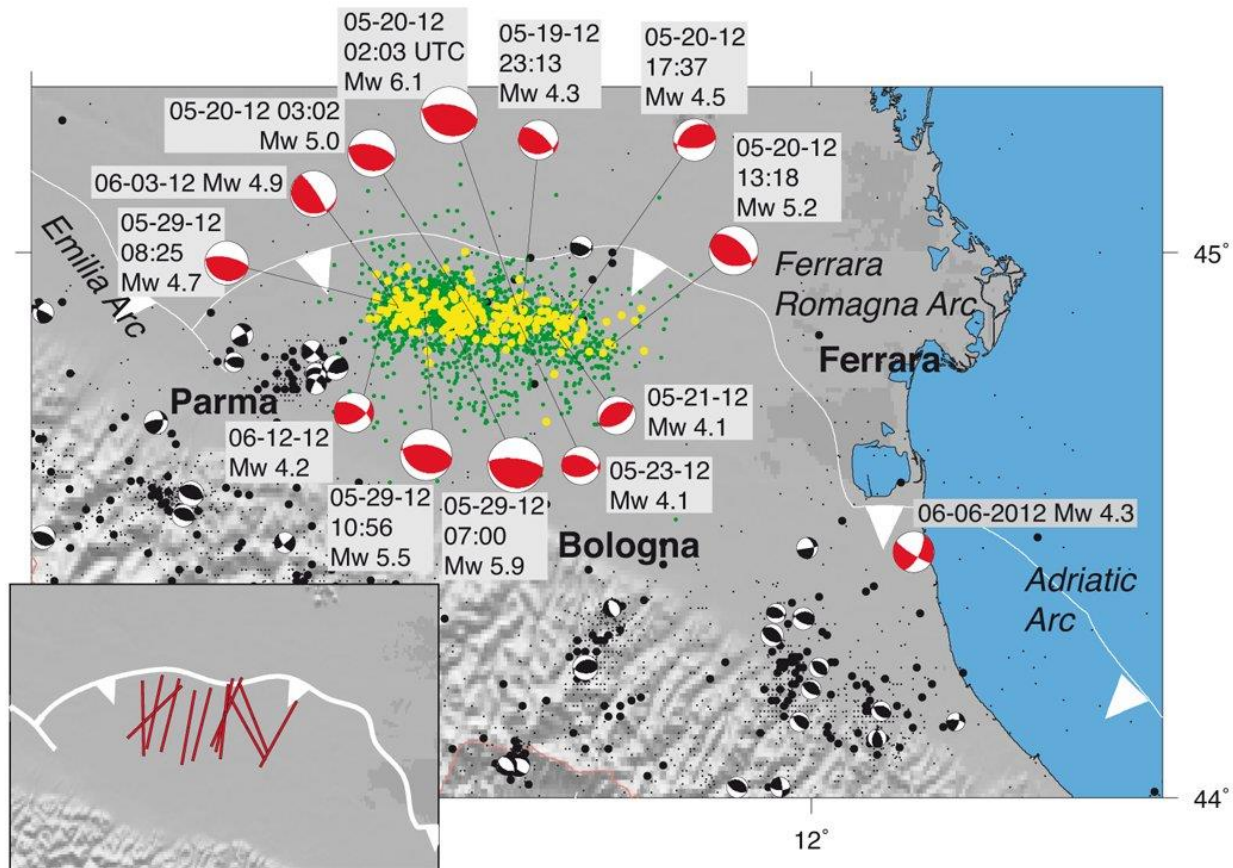


Figura 2-3 - Mappa che mostra i meccanismi focali delle scosse maggiori (in rosso), ricavati dall'INGV a partire dal calcolo del momento tensore e i loro assi P (nel riquadro in basso a sinistra). In verde la sismicità con $M < 3.0$; in giallo quella con $M \geq 3.0$. I meccanismi focali più piccoli in nero sono relativi alla sismicità precedente il maggio 2012. I punti neri (con dimensioni proporzionali alla magnitudo) la precedente sismicità da ISIDE (da Pondrelli et al., 2012).

I risultati di diversi studi sui meccanismi focali degli eventi principali evidenziano 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; Figura 2-3). 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 Mirandola, valori di intensità macrosismica pari ai gradi VI-VII (20 maggio) e VII-VIII (29 maggio) della Scala MCS. Le mappa degli effetti macrosismici cumulativi dell'intera sequenza è riportata in Figura 2-4.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

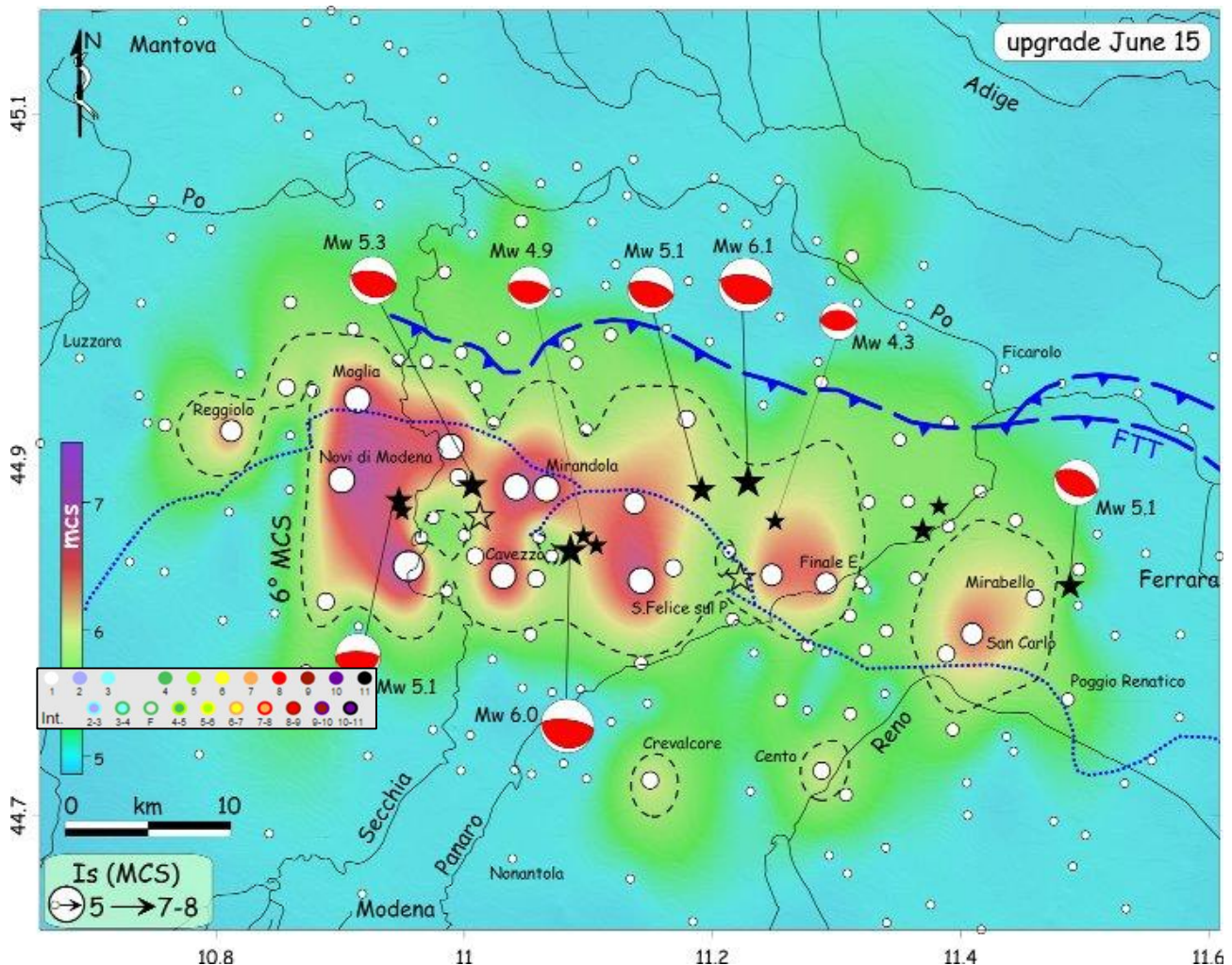


Figura 2-4 - Mappa da Galli et al. 2012b, delle intensità MCS cumulative attribuite alle singole località (punti bianchi) e di scuotimento areale in termini di MCS (sfondo colorato) per l'intera sequenza emiliana del 2012. L'isoseisma del grado VI MCS è rappresentata col tratteggio nero. Sono inoltre riportati l'arco di Ferrara (in blu) e i meccanismi focali (Pondrelli et al., 2012; Scognamiglio et al., 2012).

Nel territorio del Comune di Mirandola, 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 e agricoli con crolli, anche completi, delle coperture.

Ulteriori effetti 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle temporanee installate immediatamente dopo le scosse del 20 maggio, hanno, infatti, 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 a quelle considerate per la redazione della mappa di pericolosità di base dell'area (Figura 2-2), sono state determinate da evidenti fenomeni di amplificazione stratigrafica del moto sismico. In particolare, la stazione di Mirandola (MRN) della rete nazionale RAN, localizzata presso il campo sportivo nella zona meridionale del capoluogo comunale, ha registrato valori di accelerazione massima orizzontale pari a 303 cm/s² per la scossa del 20 maggio e pari a 290 cm/s² per quella del 29 maggio.

La sequenza sismica del maggio 2012 ha inoltre causato diffusi fenomeni di liquefazione dei terreni, dando origine, su un areale piuttosto ampio, a diverse ed evidenti manifestazioni superficiali, quali fratture, estese anche per diverse decine di metri, e fuoriuscita di sabbie e limi dal terreno (Figura 2-5). Tali effetti locali hanno assunto particolare rilevanza nei centri abitati di San Carlo, frazione di Sant'Agostino, e di Mirabello, in provincia di Ferrara, dove, oltre alle evidenze sul terreno libero, hanno prodotto diffusi danneggiamenti a carico dei manufatti, che il solo scuotimento non avrebbe potuto provocare (Galli et al., 2012a). Gli effetti secondari successivi alla liquefazione hanno infatti reso temporaneamente inagibili alcuni edifici, tratti di strade e le reti di servizi presenti (Gruppo di Lavoro Liquefazione, 2012). Per una valutazione approfondita di tali effetti, diversi enti e istituti hanno costituito e inviato squadre di tecnici specializzati che hanno eseguito rilievi specifici nei giorni immediatamente successivi alle scosse, anche attraverso riprese aeree. Tra questi: la Regione Emilia-Romagna e il Dipartimento della Protezione Civile, che hanno istituito un Gruppo di lavoro interdisciplinare che ha coinvolto geologi, geotecnici e ingegneri strutturalisti (Gruppo di Lavoro Liquefazione, 2012); l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, che ha attivato il gruppo di lavoro EMERGEO (Emergeo Working Group, 2012; 2013); la GeoProCiv - Associazione Geologi Emilia-Romagna per la Protezione Civile, che ha fornito un sostegno tecnico alle azioni di prevenzione e protezione civile per quanto concerne tutte le problematiche di carattere geologico, oltre a singoli ricercatori che hanno mappato il settore orientale (Caputo e Papathanasiou, 2012).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

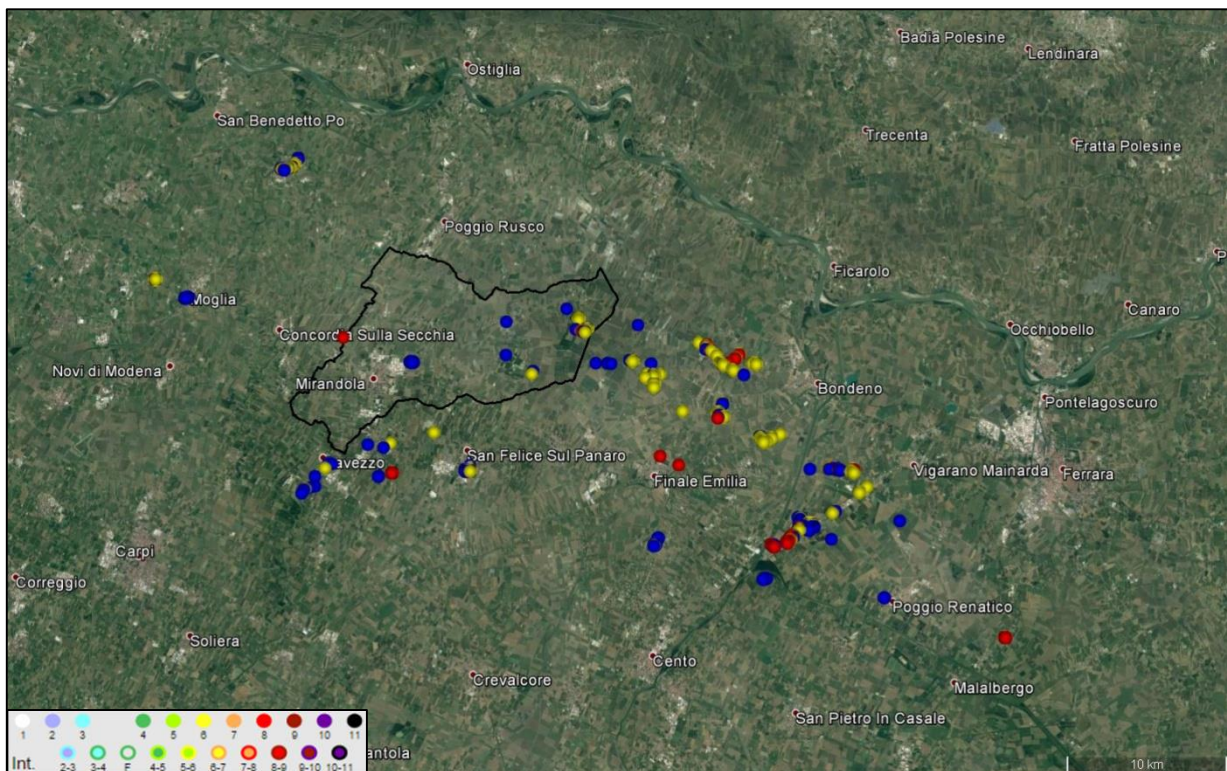


Figura 2-5 - Localizzazione degli effetti rilevati dal gruppo di lavoro EMERGEO di INGV (Emergeo Working Group, 2013) in occasione della sequenza sismica del 2012. Dei quasi 650 punti rilevati, sono indicati in rosso quelli associati a “fratture”, in blu quelli associati a “liquefazioni” e in giallo quelli in cui sono stati rilevati entrambi i fenomeni. In nero è rappresentata l’area del Comune di Mirandola.

A seguito di tale attività si sono ottenuti numerosi dati puntuali che hanno fornito un quadro piuttosto completo dei fenomeni di liquefazione verificatisi a seguito della scossa del 20 maggio ed in misura minore, limitata alla porzione più occidentale dell'area epicentrale, a seguito di quella del 29 maggio. Si tratta di oltre 2000 punti rilevati sul terreno e da riprese aeree da tutti i gruppi coinvolti, anche se in molti casi si tratta della stessa emergenza rilevata più volte da gruppi diversi. Inoltre, le informazioni associate ai punti rilevati sono di natura diversa per i diversi gruppi e non sempre è stata rilevata la tipologia del fenomeno osservato. Per queste ragioni il rilievo più completo ad oggi disponibile appare quello del gruppo di lavoro EMERGEO di INGV (Emergeo Working Group, 2013) di cui in Figura 2-5 è riportata la localizzazione degli effetti distinti per tipologia, in rapporto all'area di studio.

È bene ricordare che la mancanza di evidenze superficiali quali la fuoriuscita di sabbia dal terreno, non esclude che il fenomeno della liquefazione possa essersi comunque verificato a carico dei depositi sabbiosi saturi presenti in profondità, dando luogo, in ogni caso, a cedimenti del terreno più o meno evidenti in superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* versione 3.2.1 (DISS Working Group, 2018) mostra come il territorio di Mirandola sia interessato dalla presenza di ben tre sorgenti sismogenetiche composite (ITCS050, ITCS051, ITCS103; Figura 2-6).

La ITCS050, denominata Poggio Rusco-Migliarino ed orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima ($M_{w_{max}}$) pari a 5.5, profondità tra 1 e 8 km e slip-rate compreso tra 0.39 e 0.45 mm/anno.

La ITCS051, denominata Carpi - Poggio Renatico ed orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) ed è caratterizzata da $M_{w_{max}}$ pari a 6, profondità tra 2 e 10 km e slip-rate compreso tra 0.5 e 1.04 mm/anno.

La ITCS103, denominata Finale Emilia - Mirabello, anch'essa con orientazione Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134) ed è caratterizzata da $M_{w_{max}}$ pari a 6.1, profondità tra 3.5 e 10 km e slip-rate compreso tra 0.25 e 0.5 mm/anno.

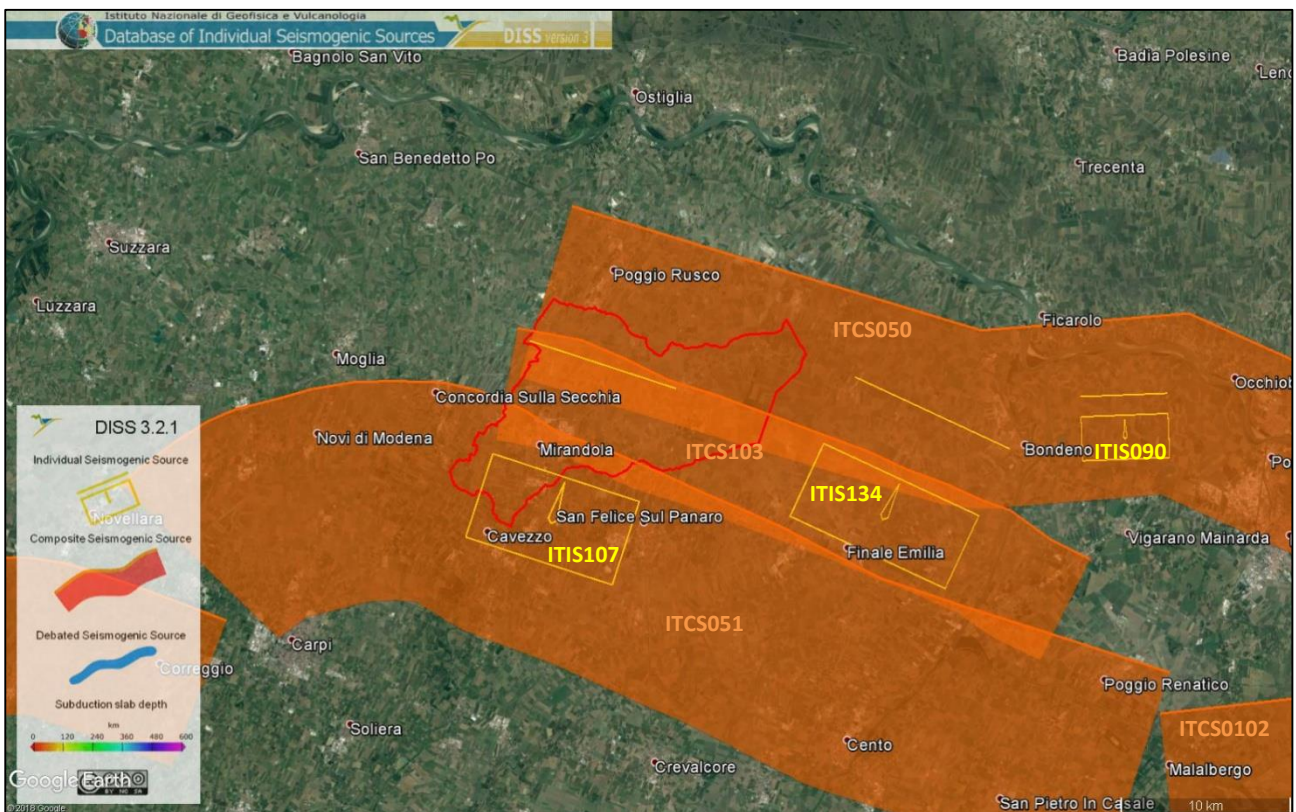


Figura 2-6 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Cento.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Rispetto alle sorgenti individuali citate vale la pena ricordare che, mentre quella di Mirandola (ITIS107), coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già nota e inserita nelle versioni di DISS anteriori al 2012, sia in base a prospezioni geologiche profonde, sia mediante osservazione di anomalie nel reticolo idrografico (Burrato *et al.*, 2003; 2012), quella di Finale Emilia (ITIS134) è invece stata proposta sulla base della localizzazione dell'evento del 20 maggio 2012 ed inserita nella versione 3.2.0 del DISS.

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 composita.

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 Comune di Mirandola ricade entro alla Zona 912 - "Dorsale Ferrarese", caratterizzata da un valore di $M_{w_{max}}$ pari a 6,14.

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Il territorio del comune di Mirandola si sviluppa nell'area di bassa pianura modenese e confina a nord con la Provincia di Mantova (Regione Lombardia) e a est con il Comune di Bondeno (Provincia di Ferrara).

3.1 Assetto strutturale

Il contesto in cui si colloca l'area in esame è quello del Bacino Padano che strutturalmente rappresenta un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico (Pieri e Groppi, 1981).

La zona indagata si trova nella zona di raccordo fra la parte esterna della catena Appenninica settentrionale, strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore, e il settore padano in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene superiore e Quaternario. Tali deformazioni sepolte rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (Pieri e Groppi, 1981).

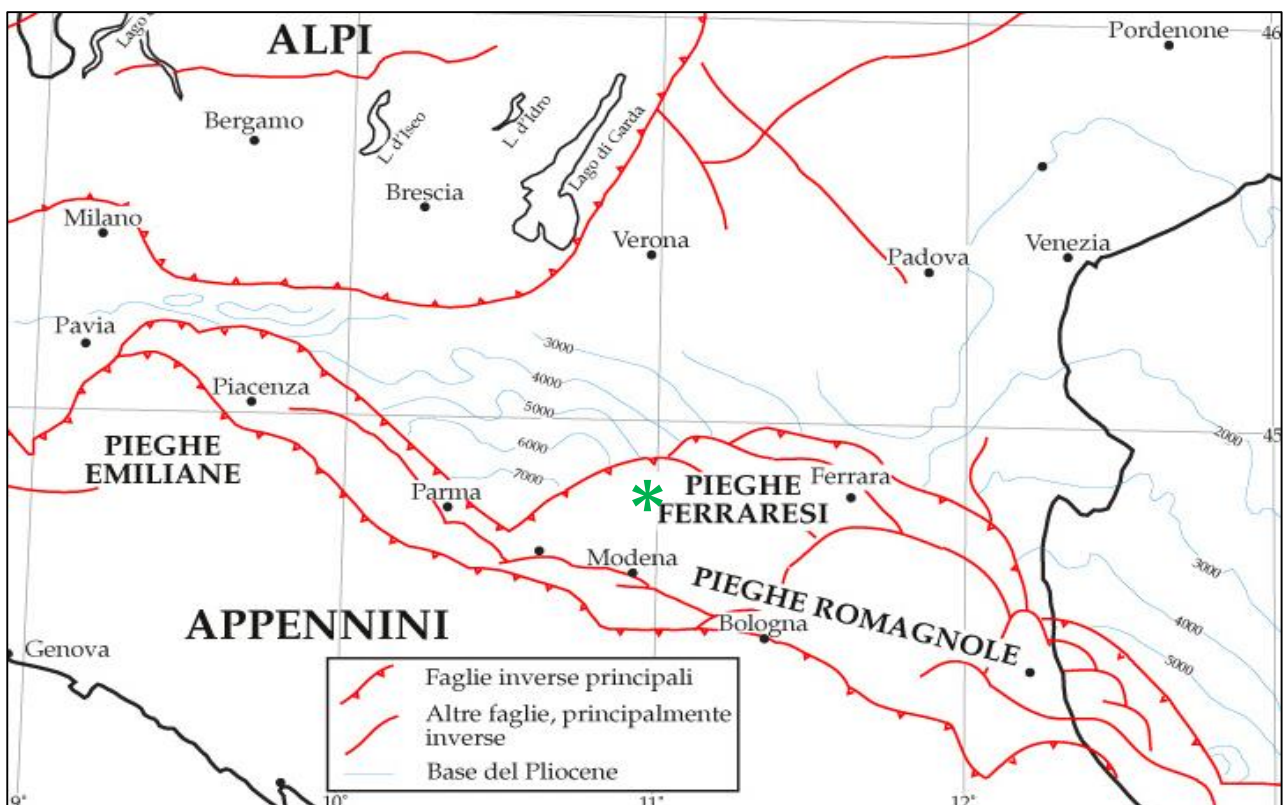


Figura 3-1 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area di studio è indicata con l'asterisco verde.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

In particolare, la zona di Mirandola si trova al di sopra dell'arco delle Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981; Zoetemeijer, 1993) o Dorsale Ferrarese che presenta qui una zona di alto strutturale conosciuta come l'alto di Mirandola (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), dove la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS), datata a 0,45 Ma, è ad una profondità inferiore a -100 metri sul livello del mare (addirittura inferiore a -50 metri ad ovest di Mirandola) (Boccaletti *et al.*, 2004; Boccaletti e Martelli, 2004).

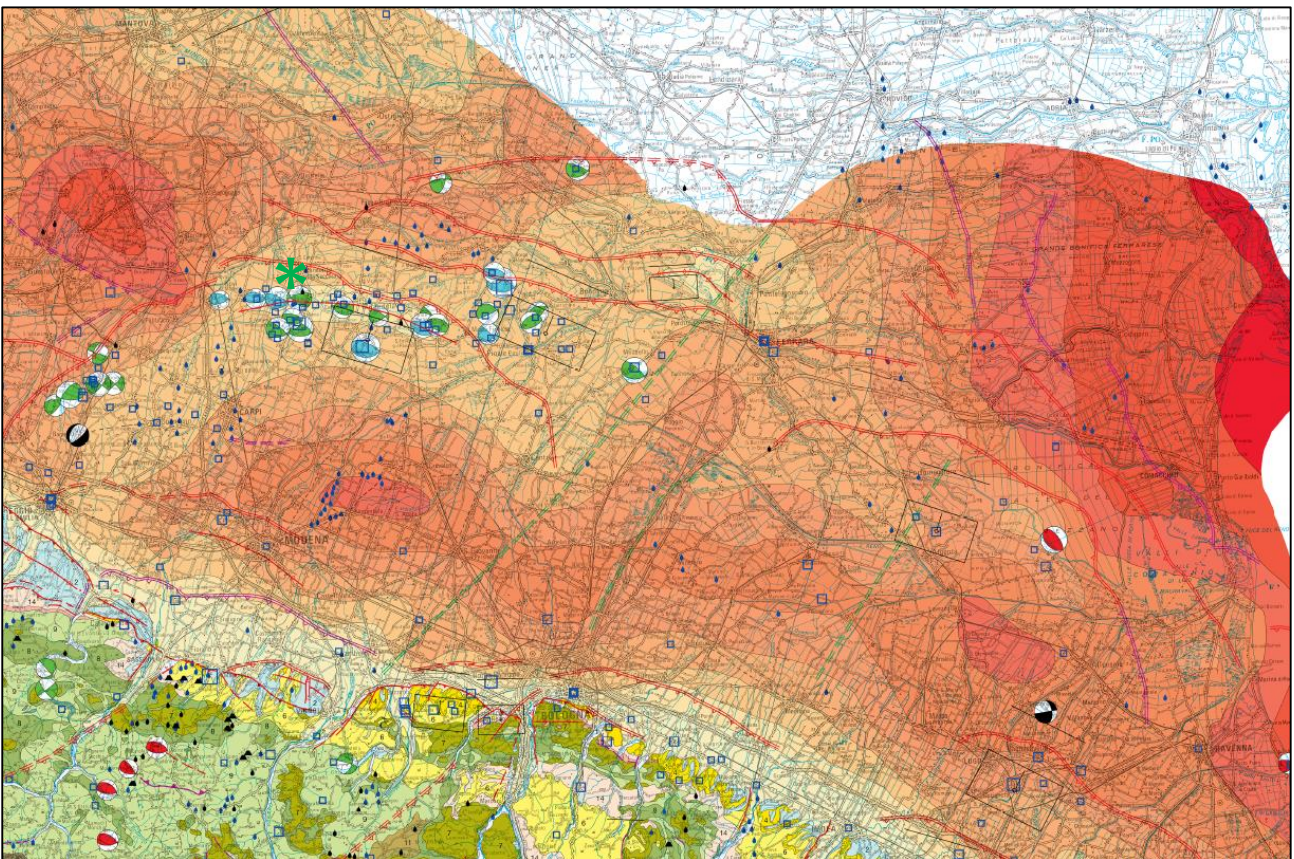


Figura 3-2 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area di studio è indicata con l'asterisco verde.

Questo settore del bacino del Po è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative. La fase pliocenica viene denominata di flysch, in contrasto con i sedimenti di molassa che hanno caratterizzato la fase successiva, nella quale divenne dominante l'input di materiale erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

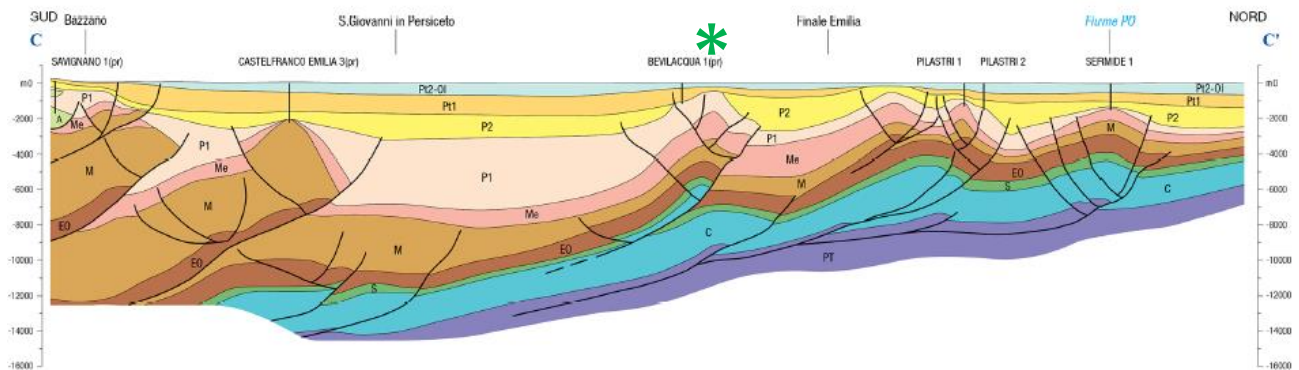


Figura 3-3 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'anticlinale di Mirandola è indicata con l'asterisco verde.

Con il Pleistocene si instaura un nuovo ciclo sedimentario (Qm, Ricci Lucchi *et al.*, 1982), che porta al colmamento del Bacino Padano in un regime di subsidenza generalizzata. Gran parte delle aree in precedenza emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa. Tale sedimentazione grossolana prosegue poi, ininterrottamente, fino all'Attuale: in essa, però, si passa da facies torbiditiche di bacino a facies di scarpata, poi costiere ed infine alluvionali, pur rimanendo in termini sabbiosi. Successivamente, la sedimentazione diviene esclusivamente continentale, e prosegue con i depositi fluvio-lacustri delle alluvioni padane (Qc, Ricci Lucchi *et al.*, 1982). I sedimenti sabbiosi, limosi ed argillosi, che riempiono la parte più superficiale del bacino, sono stati depositi dal fiume Po e dagli altri fiumi tributari che provengono dalla catena appenninica (Ori, 1994; Vittori e Ventura, 1995; Amorosi *et al.*, 1999). Nel Pleistocene medio, quindi, la prosecuzione del sollevamento comporta il definitivo instaurarsi della deposizione continentale e inizia a sedimentarsi il Supersistema Emiliano Romagnolo corrispondente al Qc di Ricci Lucchi *et al.* 1982.

I depositi del Quaternario, soprattutto del Pleistocene medio-superiore, rappresentano degli accumuli disposti in amplissime ondulazioni, con geometrie lenticolari che indicano il colmamento delle depressioni residue dei bacini pliocenici precedenti.

3.2 Contesto geomorfologico

Il territorio si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale, formata da depositi di fiumi di provenienza appenninica. L'area di studio risulta influenzata dalle alluvioni del Fiume Panaro e in parte del fiume Po.

Per un quadro ad ampia scala delle caratteristiche dei depositi in profondità si può fare riferimento alla cartografia redatta dalla Provincia di Modena nell'ambito del PTCP 2009 in relazione agli studi di microzonazione sismica del territorio provinciale. In particolare in **Errore. L'origine riferimento non**

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

è stata trovata. è riportato un estratto della carta “Aree potenzialmente soggette ad effetti locali per eventi sismici” del Quadro Conoscitivo del PTCP, in cui sono indicate le principali litologie affioranti quali limi e argille di piana alluvionale e sabbie di canale. In tutta l’area comunale di Mirandola, ad eccezione di una piccola porzione nella zona più meridionale, è inoltre segnalata la presenza in profondità di sabbie sepolte depositate dal fiume Po.

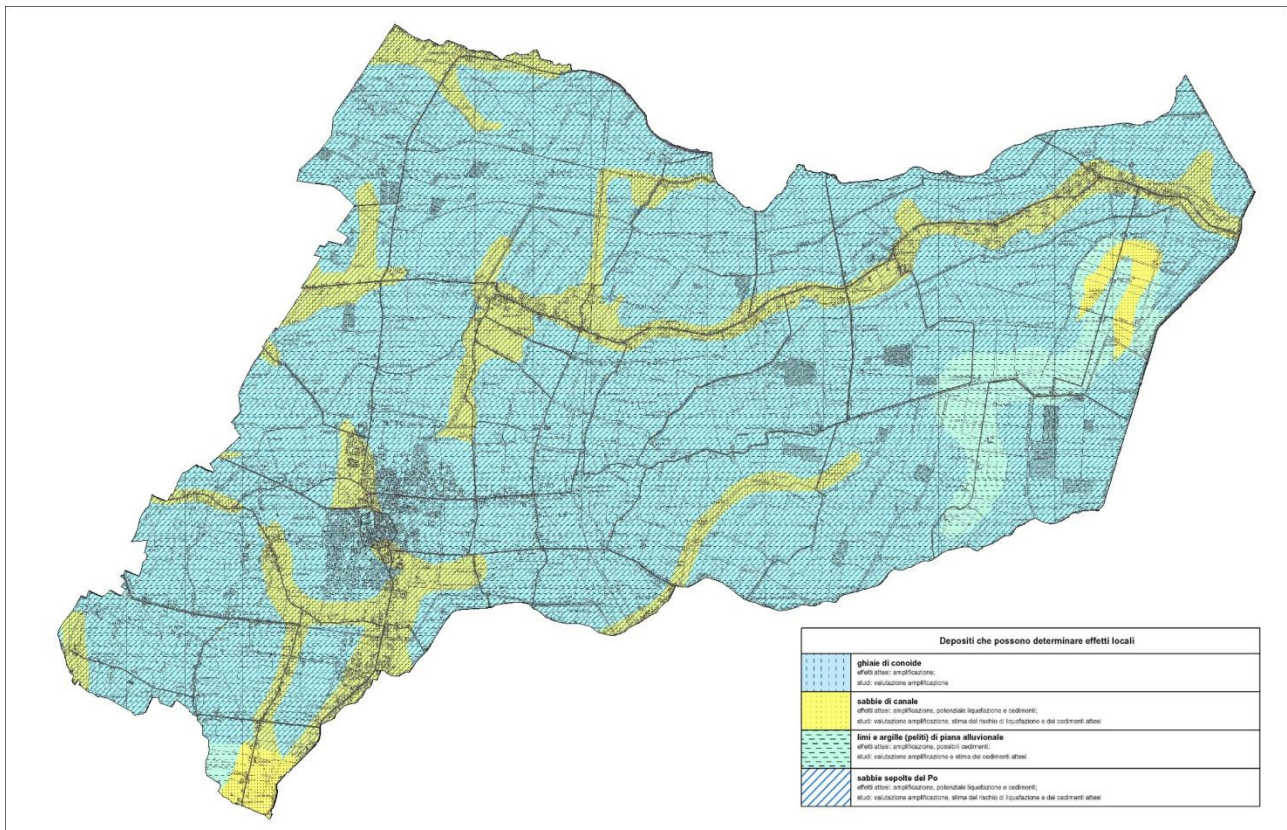


Figura 3-4 - Estratto per l’area comunale di Mirandola della carta “Aree potenzialmente soggette ad effetti locali per eventi sismici” del Quadro Conoscitivo del PTCP di Modena.

Nell’area di studio non vi sono particolari evidenze geomorfologiche. Le aree sono tutte sub-pianeggianti con una leggera inclinazione in direzione nord-nord-est in concordanza con l’andamento generale di questo settore della Pianura Padana. Ad una analisi di maggiore dettaglio è però possibile osservare come la morfologia del territorio sia caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali ed estesi corpi di argine naturale che sfumano in depressioni interalvee. Tali caratteristiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio

3.3 Contesto geologico e stratigrafico

Il sottosuolo di questa porzione della pianura emiliana è prevalentemente costituito da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale di età Pleistocene medio-Olocene riferibili a due cicli deposizionali di ordine maggiore: il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), di età compresa tra 700.000/650.000 e 450.000/400.000 anni, e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), di età compresa tra 450.000/400.000 anni e l'Attuale (RER & ENI-Agip, 1998). Questa successione continentale poggia generalmente su un substrato costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio, riferibili alla Sabbie Gialle o Sabbie di Imola del margine appenninico-padano (RER & ENI-Agip, 1998).

La profondità della base della successione alluvionale varia in funzione della presenza della geometria delle Pieghe Ferraresi; nelle aree di sinclinale lo spessore delle alluvioni supera i 500 m mentre nelle aree di anticlinale si riduce fino a meno di 100 m (RER & ENI-Agip, 1998). Nelle zone di alto strutturale il substrato è talora fortemente eroso e anche i depositi del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) hanno spessore ridotto e sono presenti estese lacune stratigrafiche; nello specifico, tra Novi di Modena e Medolla, sull'alto delle Pieghe Ferraresi interne (anticlinale di Mirandola), il tetto del substrato marino, identificato a profondità inferiori a 100 m, è costituito da limi e sabbie marine del Pliocene inferiore (Martelli e Romani, 2013).

Il territorio del Comune di Mirandola ricade nel Foglio 184 della Carta Geologica in scala 1:50.000 della Regione Emilia-Romagna (Progetto CARG), che al momento risulta ancora non realizzato. La Carta Geologica di Pianura della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (Regione Emilia Romagna - Ufficio Geologico, 1999) risulta quindi l'unica cartografia geologica recente attualmente disponibile, ma i contenuti informativi appaiono inadeguati alla scala del presente lavoro. Un riferimento di base per i dati geologici e litologici di superficie è rappresentato dalle Carte per la Sicurezza del Territorio e da quelle del Quadro Conoscitivo del PTCP 2009 della Provincia di Modena, realizzate per la definizione del rischio sismico alla scala provinciale.

Per la definizione del modello geologico in profondità a scala comunale, possono essere utilizzate le due sezioni geologiche di dettaglio realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per lo studio geologico finalizzato alla ricerca di potenziali serbatoi geotermici nel sottosuolo del comune di Mirandola (Martelli e Molinari, 2008), riportate nell'Allegato 1. In particolare in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

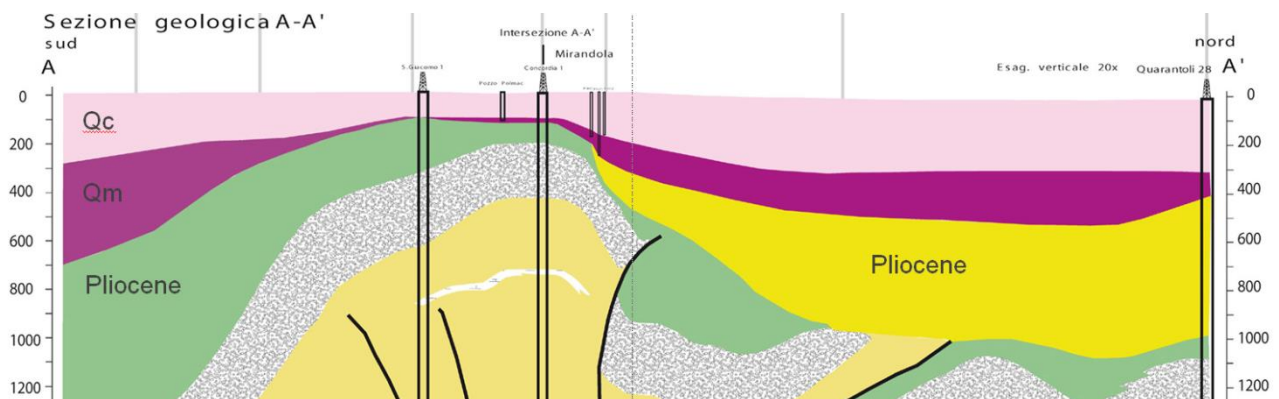


Figura 3-5 - Estratto della sezione A-A' riportata nell'Allegato 1 ad andamento SSO/NNE, in cui sono evidenti gli effetti dell'anticlinale di Mirandola sui depositi superficiali e profondi (modificata da Martelli e Molinari, 2008). In verde sono indicati i depositi del Pliocene inferiore, in giallo quelli del Pliocene medio.

In particolare, come vedremo successivamente ben evidenziato dalle misure di microtremore a stazione singola effettuate sin del 2011 (Tarabusi, 2012), la base del Quaternario Marino (Qm) - tetto del Pliocene, che si attesta a profondità di oltre 1000 metri in aree di sinclinale della pianura emiliana, si ritrova a profondità anche inferiori a 100 metri nella zona di San Giacomo Roncole (Tarabusi e Caputo, 2017).

Nell'ambito dello studio di microzonazione realizzato nel 2013 a seguito dell'Ordinanza n.70 del 13/11/2012 (Martelli e Romani, 2013) sono state realizzate diverse indagini ed in particolare 2 sondaggi profondi, finalizzati ad intercettare il substrato geologico e sismico (tetto dei depositi del Pliocene inferiore) e a investigare in dettaglio la stratigrafia dei depositi quaternari, proprio in corrispondenza dell'alto strutturale di Mirandola: uno a Mirandola sud, spinto a 125 m di profondità, e uno a Medolla nord, spinto fino a 100 m. In corrispondenza di entrambi è stata eseguita una prova *cross-hole* per la misura diretta della velocità delle onde sismiche longitudinali (V_p) e di taglio (V_s) fino a fondo foro (Martelli e Romani, 2013). In Figura 3-6 sono riportate le sintesi stratigrafiche e sismiche di entrambe le indagini.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

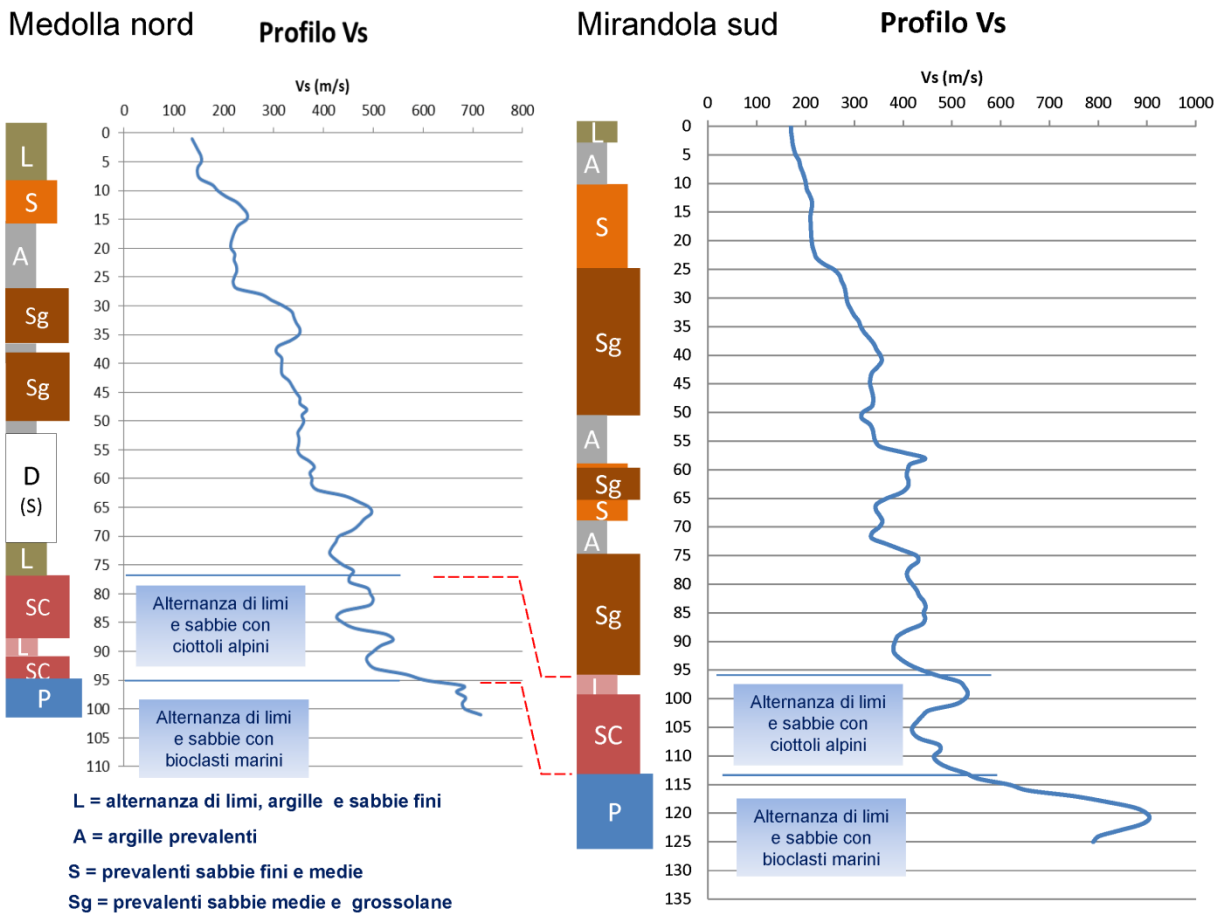


Figura 3-6 - Stratigrafie e profili di Vs dei due sondaggi con *cross-hole* realizzati dalla Regione Emilia-Romagna nel 2013 (Martelli e Romani, 2013). In azzurro, contrassegnati con la lettera P, sono rappresentati i depositi pliocenici. I rapporti di prova del sondaggio denominato "Mirandola sud" sono archiviati in banca dati con i codici 036022P829S847 (stratigrafia) 036022P829DH857 (profili di Vs e Vp).

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 come quelli riportati in Figura 3-6, sia da sondaggi a distruzione di nucleo o pozzi per idrocarburi (anche in aree limitrofe a quella del comune di Mirandola), 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 log parametrici derivanti da prove penetrometriche statiche (CPT), da piezoconi digitali (CPTU e SCPTU), oltre ai rapporti di prova di indagini geofisiche tipo *Down-Hole*, *Cross-Hole*, *HVSR*, *MASW* e in *Array*.

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 1101 prove pregresse mediamente di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati dati di sottosuolo di altri Comuni, ubicati in prossimità del confine amministrativo. Tali dati, non riportati in carta, hanno permesso di aumentare le conoscenze geologiche in tali aree e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali cartografati e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

Le indagini ritenute effettivamente 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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche	CPT	464
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTE	2
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	186
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	28
Prove penetrometriche dinamiche	SPT	3
Sondaggi a carotaggio continuo	S	28
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	1
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	224
Prova sismica in foro tipo <i>Down-Hole</i>	DH	2
Prova sismica in foro tipo <i>Cross-Hole</i>	CH	2
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	139
Extended Spatial Autocorrelation	ESAC-SPAC	13
Refraction Microtremor	REMI	2
Prove di colonna risonante	CR	2
Analisi su campione	SM	4
	TOTALE	1101

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

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.

L'abbondanza e la distribuzione tutto sommato omogenea delle indagini geognostiche pregresse, ha consentito una chiara ed accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico, con buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche e geofisiche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo. Ottima è risultata la disponibilità di indagini geofisiche pregresse volte ad individuare i principali contrasti di impedenza ed a fornire indicazioni sulle velocità delle onde di taglio a maggiori profondità.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

In considerazione della tipologia e della distribuzione delle indagini pregresse disponibili, a supporto del presente studio di microzonazione sismica del Comune di Mirandola è stata direttamente realizzata una campagna di indagine mirata a caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e gli ambiti urbani consolidati in cui erano presenti solo poche indagini di qualità modesta. Nello specifico sono state realizzate 12 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) e 2 misure di microtremore a stazione singola (HVSr). Aggiungendo tali prove a quelle pregresse indicate nella tabella 4-1 si arriva ad un totale di 1115 indagini archiviate nella banca dati.

4.2.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

Le prove penetrometriche di tipo statico consentono di risalire, mediante correlazioni empiriche, alla natura dei corpi sedimentari presenti nel sottosuolo analizzando il rapporto tra resistenza alla penetrazione (q_c) ed attrito laterale (f_s) prodotto da una punta conica spinta nel terreno a velocità costante.

Le CPTU (*Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*) si eseguono tramite un penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono la quale, collegata mediante cavo elettrico ad un'unità di acquisizione in superficie, permette di misurare anche il valore della pressione interstiziale (u) presente tra i pori dei sedimenti, in modo da determinare la trasmissività idraulica dei corpi sedimentari indagati.

Questa tecnica consente di meglio discriminare i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato, con una precisione centimetrica all'avanzamento.

Le indagini sono state eseguite mediante penetrometro statico equipaggiato di punta elettrica Pagani con le seguenti caratteristiche:

- | | | |
|---------------------------------|---------|---------------------|
| - diametro di base del cono | $f =$ | 36 mm |
| - area della punta conica | $A_p =$ | 10 cm ² |
| - angolo apertura del cono | $B =$ | 60° |
| - superficie laterale manicotto | $A_m =$ | 150 cm ² |

Le prove sono state generalmente spinte fino a 20 m (o comunque fino al rifiuto strumentale), profondità entro la quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

I dati penetrometrici (qc, fs) sono stati elaborati sia per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, sia per eseguire verifiche a liquefazione con metodi semplificati.

Le indagini penetrometriche CPTU hanno interessato le località riportate in Tabella 4-.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTU01	036022P893CPTU928	44.8910°	11.0575°	Viale Agnini, 35 Mirandola	05/04/2018	19,93 m	3,40 m
CPTU02	036022P894CPTU929	44.8880°	11.0716°	Via Brunatti, 1 Mirandola	08/03/2018	20,02 m	3,90 m
CPTU03	036022P895CPTU930	44.8899°	11.1002°	Via G. Tucci, 56 Mirandola	08/03/2018	20,02 m	3,25 m
CPTU04	036022P896CPTU931	44.8776°	11.0567°	Via dei Mille, 12 Mirandola	24/03/2018	19,98 m	4,50 m
CPTU05	036022P897CPTU932	44.8818°	11.0611°	Viale Confalonieri, 6 Mirandola	24/03/2018	20,02 m	2,70 m
CPTU06	036022P898CPTU933	44.8593°	11.0394°	Via Dosso, 32 Crocicchio Zeni	28/02/2018	20,09 m	4,60 m
CPTU07	036022P899CPTU934	44.8601°	11.0572°	Via Santa Liberata, 1 San Giacomo Roncole	24/03/2018	19,98 m	2,10 m
CPTU08	036022P900CPTU935	44.9194°	11.0969°	Via Ermete Diazzi, 6 Quarantoli	01/03/2018	20,02 m	3,70 m
CPTU09	036022P901CPTU936	44.9234°	11.0957°	Via della Pieve, 4 Quarantoli	01/03/2018	20,08 m	2,30 m
CPTU10	036022P902CPTU937	44.9380°	11.2258°	Via di Dietro, 122 Baia	05/04/2018	19,52 m	2,60 m
CPTU11	036022P903CPTU938	44.8771°	11.1269°	Via A.Baraldini, 10A Mortizzuolo	28/02/2018	20,01 m	1,00 m
CPTU12	036022P904CPTU939	44.9300°	11.2023°	Via delle Valli, 399 Tre Gobbi	05/04/2018	16,20 m	1,00 m

Tabella 4-2 - Sintesi dei dati principali associati alle 12 indagini penetrometriche CPTU eseguite.

4.2.2 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva, inizialmente non previste dall'incarico, ma realizzate in due aree in cui non erano presenti dati di questa tipologia, sono state eseguite con tromografo digitale SARA e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed alle analisi HVSr del sottosuolo (Albarello 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).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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

Le due misure tomografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica sono state eseguite con un tomografo digitale SARA SL06 con sensori a 2.0 Hz, orientato secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m. L'acquisizione dei dati è stata effettuata generalmente con frequenza di campionamento di 300 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 30 minuti.

In Tabella 4- sono riportati i principali dati associati a ciascuna delle misure di microtremore realizzate e utilizzate per lo studio di microzonazione.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	DATA	DURATA	f ₀	A ₀
HVSR01	036022P883HVSR918	44.9236°	11.0642°	11/10/2017	30 min	0.7	2.4
HVSR02	036022P884HVSR919	44.9314°	11.2025°	11/10/2017	30 min	0.7	2.7

f₀ = Frequenza naturale

A₀ = Ampiezza del picco di f₀

Tabella 4-3 - Principali dati associati alle 2 misure di microtremore a stazione singola HVSR di nuova esecuzione.

5 Modello del sottosuolo

Per la definizione del modello di sottosuolo descritto nel presente capitolo ci si è riferiti innanzitutto allo schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998), che indica le principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità in relazione alle sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche e che viene riportato in Figura 5-1.

Una fase fondamentale per l'elaborazione della microzonazione sismica è stata l'individuazione del substrato sismico (bedrock), caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito dal valore di velocità delle onde di taglio (V_s) 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 strati presenti nel sottosuolo del sito indagato, per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità occorre disporre una calibrazione dell'architettura stratigrafica del sottosuolo derivante da fonti indipendenti, come sondaggi e profili sismici. Nella pianura emiliana il "bedrock" risulta sepolto a profondità in genere non indagate dalle normali indagini geognostiche realizzate a supporto delle costruzioni e raggiunte solo da un ridotto numero di pozzi, realizzati in passato per la ricerca di idrocarburi. A queste profondità del sottosuolo non sono in genere 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-stratigrafico regionale, derivato dall'interpretazione di numerose linee sismiche profonde, effettuate in gran parte dall'AGIP, e dai pochi 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 a volte anche brusche accelerazioni attraverso varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti vengono in genere utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. 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).

Come visto nel capitolo 3, nella porzione meridionale del Comune di Mirandola, per effetto della presenza dell'anticlinale sepolta (Figura 3-5), il bedrock sismico (qui rappresentato dal tetto delle successioni del Pliocene inferiore) si attesta a profondità inferiori a 100 metri, quando in aree di sinclinale la stessa superficie si rinviene ad oltre 1000 metri dal piano campagna. Tale dato è accertato dalle prospezioni sismiche realizzate per la ricerca degli idrocarburi, calibrate a partire dai dati stratigrafici dei pozzi profondi

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

perforati nell'area, come il Pozzo Concordia, Pozzo San Giacomo, Pozzo Quarantoli, Pozzo Medolla, Pozzi Cavone, le cui stratigrafie non risultano pubbliche sul sito UNMIG (<http://unmig.mise.gov.it/unmig/pozzi/pozzi.asp>), ma sono citate ed in parte riprodotte da chi ha potuto consultarle in via riservata per scopi di ricerca (Martelli e Molinari, 2008; Tarabusi e Caputo 2017). È sulla base di questi dati che, nell'ambito dello studio di microzonazione realizzato nel 2013 a seguito dell'Ordinanza n.70 del 13/11/2012 (Martelli e Romani, 2013) sono stati realizzati 2 sondaggi profondi in corrispondenza dell'alto strutturale di Mirandola, finalizzati ad intercettare il bedrock sismico, a investigare in dettaglio la stratigrafia dei depositi quaternari e a misurare direttamente la velocità delle onde sismiche longitudinali (V_p) e di taglio (V_s) fino a fondo foro (Figura 3-6).

L'analisi di questi dati di grande dettaglio disponibili per la zona di alto strutturale, hanno consentito una calibrazione piuttosto affidabile del dato ricavato dalle misure di microtremore a stazione singola (HVSr), che, associato alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso di stimare con buona affidabilità la profondità delle superfici che generano i principali contrasti di impedenza rilevabili con la tecnica HVSr. In particolare, la superficie a cui è associato un più marcato aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche in tutta l'area di studio è individuata, come vedremo in dettaglio nel capitolo successivo, al tetto di successioni del Pliocene. Queste alternanze di sabbie e argille 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 *cross-hole* profondo in zona di anticlinale a Mirandola (Martelli e Romani, 2013; Garofalo *et al.*, 2016) e nella vicina Medolla (Martelli e Romani, 2013) e di *Down-Hole* profondo in zona di sinclinale nei pressi di Mirabello (Minarelli *et al.* 2016), hanno consentito una correlazione robusta tra i valori di V_s registrati all'interno delle unità quaternarie in contesti diversi. In particolare i dati mostrano come anche in zone di sinclinale i depositi fra i 200 e i 300 m di profondità le V_s siano ancora piuttosto 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 rilevato dalle misure HVSr e probabilmente sempre correlabile, anche in zona di sinclinale, con il tetto dei depositi pliocenici. Questa superficie è stata ampiamente piegata dalla deformazione tettonica, per cui, nelle diverse porzioni della pianura emiliana, si trova oggi a profondità notevolmente variabile. Essa, come abbiamo visto, è relativamente prossima alla superficie nella fascia di anticlinale, nella parte

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

meridionale del territorio comunale, mentre si approfondisce rapidamente, fino ad attestarsi a profondità comprese tra 350 e 500 metri nella fascia settentrionale del territorio comunale (Figura 3-6 e Allegato 1).

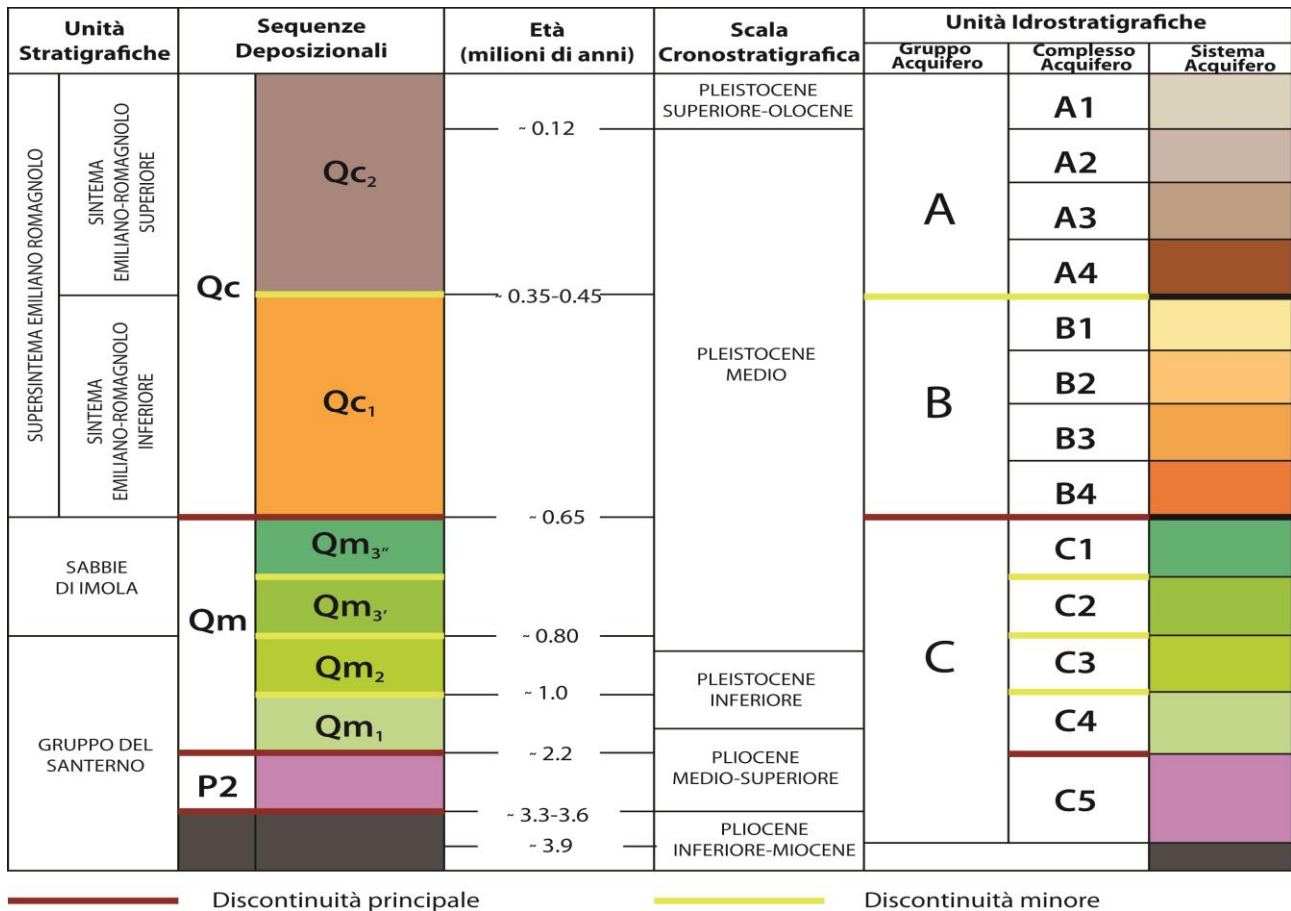


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.1 Substrato

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

Come precedentemente accennato, il substrato è qui limitato al tetto da una superficie netta di discordanza, che marca il tetto di depositi di varia natura ed età.

Nell'area indagata a tale superficie corrisponde sempre al tetto dei corpi pliocenici, ma è evidentemente associata ad una variabile lacuna temporale (Figura 3-5). La superficie si sovrappone infatti a depositi di età variabile, più antica nelle aree di culminazione anticlinale (Pliocene inferiore), più recenti muovendosi verso nord (Pliocene medio), come riportato nelle sezioni presenti nell'Allegato 1. Anche l'età della base dei successivi depositi quaternari è certamente variabile. La combinazione di questi due fattori fa sì che la

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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.

Nelle sezioni geologiche riportate dell'Allegato 1 (Martelli e Molinari, 2008), i depositi del Pliocene medio, presenti solo nella porzione settentrionale del territorio comunale, non vengono definiti in modo più specifico, ma si può supporre che siano costituiti prevalentemente da depositi prevalentemente di tipo torbiditico. Nelle stesse sezioni i depositi del Pliocene inferiore, vengono attribuiti, per i primi 100/200 metri alle Argille del Santerno e quindi, a maggiore profondità, alla formazione di Porto Garibaldi (torbiditi prevalentemente sabbiose). Come informazione di maggiore dettaglio, secondo quanto direttamente indagato attraverso i recenti sondaggi profondi (Martelli e Romani, 2013), riportati in Figura 3-6, i primi 15-20 metri di depositi pliocenici che costituiscono il bedrock sismico in area di anticlinale risultano costituiti da alternanze di limi e sabbie con bioclasti marini.

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 emiliana, 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 prevalenza costituita da argille di mare aperto (Martelli e Molinari, 2008) con spessori fino a 200 m nelle zone di sinclinale e spessori assai più ridotti, nella zona di alto strutturale e a scomparire del tutto in corrispondenza della culminazione dello stesso (Allegato 1).

Il Quaternario Marino è frequentemente limitato al tetto da una discordanza stratigrafica, anche angolare, associata ad una lacuna cronologica, che lateralmente passa in condizioni di paraconcordanza.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo)

La discordanza sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da sedimenti di origine alluvionale costituiti da un'alternanza di sabbie e limi depositati dal Po e dai suoi affluenti (Martelli e Molinari, 2008).

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri più 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.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa. In aree di culminazione di anticlinale, la superficie di discordanza può anche forse arrivare a sovrapporsi direttamente ai sedimenti del Pliocene.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) presenta quindi uno spessore variabile da zero a pochi metri delle zone di anticlinale, come quella presente nella porzione meridionale del comune di Mirandola, fino ad oltre 120 metri nelle zone depocentrali di sinclinale (Minarelli *et al.* 2016). Sulla base di questo dato è ragionevole ritenere che nella zona settentrionale del comune di Mirandola, dove lo spessore dell'intero Quaternario continentale raggiunge un massimo di circa 300 metri, quello del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) possa essere nell'ordine dei 100 metri. I circa 15-20 metri di AEI indagati dai sondaggi profondi eseguiti in zona di anticlinale e riportati in Figura 3-6, sono costituiti prevalentemente da sabbie con ciottoli alpini alternate a limi.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, che mostrano ciascuno uno spessore di circa 30-40 metri, in corrispondenza delle aree di sinclinale e spessori minori, di circa 20 metri, nelle aree di alto strutturale (Minarelli *et al.* 2016). L'evoluzione deposizionale testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, 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 eustatico. Il limite inferiore dei cicli è in genere formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

grossolana singlaciale. La porzione trasgressiva basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille di piana alluvionale. Le porzioni regressive sono invece costituite da 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 maggiormente continui.

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 - CARG Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈).

La porzione meglio conosciuta della successione risulta senza dubbio quella dei primi 20-30 metri di profondità, indagata da numerose prove geognostiche (Tabella 4.1). Come dettagliato ai paragrafi 8.2 e 8.4, nel sottosuolo del comune di Mirandola, nei primi metri al di sotto del piano campagna sono in genere presenti argille, argille limose e limi organici all'interno dei quali, in alcune fasce ben distinte, si intercalano sabbie medie e fini, a granulometria poco assortita che registrano il riempimento di canali fluviali di origine prevalentemente appenninica. A profondità variabile tra i 6 e i 15 metri si rinvengono ovunque i depositi sabbiosi del fiume Po, caratterizzati da valori elevati di resistenza alla punta (Qc in genere superiore a 10 MPA). Tali depositi sono presenti in modo continuo fino a 30 metri e oltre nella parte centro settentrionale del territorio comunale, mentre nella parte sud-occidentale dello stesso è sempre possibile distinguere due cicli distinti con sabbie intervallate da depositi limo-argillosi di spessore in genere di alcuni metri. Tale differente situazione appare un chiaro effetto sui depositi superficiali dell'anticlinale sepolta, il cui innalzamento progressivo ha reso meno continui gli apporti sabbiosi del Po nella porzione sud-occidentale del territorio comunale, allontanando progressivamente il corso del fiume in direzione nord. La stessa anticlinale ha reso nel tempo sempre più difficoltoso l'attraversamento del territorio del comune di Mirandola da parte dei fiumi appenninici (Secchia e Panaro), che non a caso oggi divergono proprio qualche chilometro prima della culminazione della struttura sepolta (Burrato *et al.*, 2003; 2012). Ciò trova riscontro nel fatto che la porzione sud-occidentale del territorio indagato risulta caratterizzata da una maggiore presenza nei primi metri di depositi sabbiosi e limosi di origine appenninica, e di conseguenza presenta valori mediamente più alti degli indici di liquefazione calcolati sulle verticali delle prove penetrometriche statiche, rispetto al resto del territorio comunale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

5.2.3 Considerazioni conclusive

Tutte le numerose influenze che l'anticlinale di Mirandola ha esercitato ed esercita a carico della successione sedimentaria presente nel sottosuolo comunale e che sono state ampiamente illustrate nel presente capitolo, vengono rilevate dalle indagini in situ, che quindi ad una attenta lettura di insieme permettono di distinguere aree a comportamento differente in caso di sisma, finalità ultima di uno studio di microzonazione sismica. Come vedremo nei capitoli successivi infatti, gli effetti del sollevamento dell'anticlinale si riflettono inevitabilmente sulle principali caratteristiche del sottosuolo che permettono di distinguere: (i) differenti terreni di copertura (carta geologico tecnica, paragrafo 8.2 e tavola 2), (ii) aree caratterizzate da frequenze di risonanza e ampiezze del picco H/V molto diverse (carta delle frequenze naturali dei terreni, paragrafo 8.3 e tavola 3), (iii) zone caratterizzate da stratigrafie differenti in relazione all'amplificazione del moto sismico e alla possibile insorgenza di effetti locali (carta MOPS, paragrafo 8.4 e tavola 4), (iv) aree caratterizzate da differenti fattori di amplificazione e valori di indice di liquefazione (carte di microzonazione sismica di terzo livello, paragrafo 8.5 e tavole 6, 7, 8 e 9).

In sostanza, quasi tutti i concetti espressi e le determinazioni raggiunte nei prossimi capitoli, traggono origine o sono comunque influenzati dalla presenza o meno nell'anticlinale sepolta di Mirandola nelle diverse porzioni del territorio comunale.

6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, partendo dall'esposizione del percorso logico seguito per delineare la struttura dello studio, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

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 provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili e treni, 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 microtremori, eseguite a supporto degli studi di microzonazione sismica (Tarabusi, 2012) e della pianificazione territoriale (Tarabusi, 2015).

Ove necessario 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 di marcate velocità in grado di determinare una non corretta interpretazione della curva HVSR.

Considerando le incertezze e le problematiche esposte, già nel corso della prima campagna di indagini realizzata a supporto della microzonazione sismica di primo livello è stato necessario realizzare ben 117 registrazioni prima di ottenere i risultati delle 104 indagini di sismica passiva a stazione singola considerate valide (Tarabusi, 2012). In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta talvolta accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare alcune delle misure all'epoca realizzate.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Oggi, a seguito della raccolta dati realizzata per il presente studio risultano archiviate in banca dati ben 226 misure realizzate con strumenti diversi e analizzate con differenti software e utilizzando parametri e algoritmi variabili. Per poter disporre di un sott'insieme sufficientemente ampio di dati che fossero per quanto possibile omogenei e quindi confrontabili, oltre che sicuramente affidabili, per la redazione della Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (Tavola 3) e per correlarne i risultati con i dati stratigrafici disponibili è stata utilizzata solo una parte di tutte le misure archiviate, definite ad affidabilità alta. Si tratta di 118 misure in tutto, costituite da quelle realizzate a supporto della microzonazione sismica di secondo livello (Tarabusi, 2012), quelle realizzate a supporto della relazione per il PSC del 2015 (Tarabusi, 2015), le due realizzate a supporto del presente studio (paragrafo 4.2.2), più alcune altre di archivio considerate comunque confrontabili e realizzate in aree non coperte dalle restanti indagini.

Le 118 misure direttamente utilizzate per la redazione della Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (Tavola 3) risultano ben distribuite arealmente e senza dubbio sufficienti a caratterizzare tutti gli ambiti di studio.

Come visto in precedenza le 118 misure direttamente utilizzate per la redazione della Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (Tavola 3) hanno fornito dati con distribuzione areale e caratteristiche strumentali omogenee che, correlati con i dati geognostici disponibili, hanno permesso di stimare la profondità del substrato geologico assimilato al bedrock (paragrafo 5.1).

La maggior parte delle acquisizioni realizzate tra il 2011 e il 2012 hanno avuto durata di 12 minuti. Tra le 118 misure scelte vi sono comunque ben 41 misure di durata compresa tra 20 e 30 minuti meglio utilizzabili per l'individuazione del bedrock sismico dove questo risulta a maggiore profondità, al di fuori dell'area di anticlinale, attraverso la correlazione dei risultati con i dati stratigrafici profondi disponibili. Tali misure hanno infatti permesso di "validare" i picchi spesso visibili a più bassa frequenza (compresi tra 0,35 e 0,6 Hz), soddisfacendo i criteri "Sesame" (AA.VV., 2004). Bisogna in ogni caso ricordare che i picchi di H/V a frequenze inferiori a 0,5 Hz possono essere influenzati dalle condizioni meteorologiche che li rendono in generale più o meno visibili (con ampiezza più o meno pronunciata) se le misure sono realizzate in tempi diversi (Albarello e Castellaro, 2011).

Le numerose misure di rumore ambientale eseguite per gli approfondimenti di microzonazione e distribuite su tutto il territorio comunale, hanno permesso, come detto, la redazione di una carta di dettaglio delle frequenze naturali dei terreni (Tavole 3, paragrafo 8.3), la quale indica che nell'area comunale le frequenze naturali dei terreni variano tra 0,4 e 1,3 Hz, con ampiezza dei picchi compresa tra 1.7 e 4.8.

I risultati sintetizzati nella tavola 3 concordano con quanto già evidenziato nella "Carta delle frequenze naturali dei terreni" dello studio microzonazione sismica di secondo livello (Tarabusi, 2012), inserita nel

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

quadro conoscitivo del PSC vigente e di cui si riporta un estratto in Figura 6-1. Tale cartografia, redatta con una originale metodologia volta a evidenziare il maggior contrasto di impedenza generato dagli effetti dell'anticlinale di Mirandola sui depositi più superficiali, risulta ancora oggi, alla luce di tutti gli approfondimenti di indagine eseguiti negli ultimi 6 anni, un valido riferimento per l'impostazione di uno studio di microzonazione sismica.

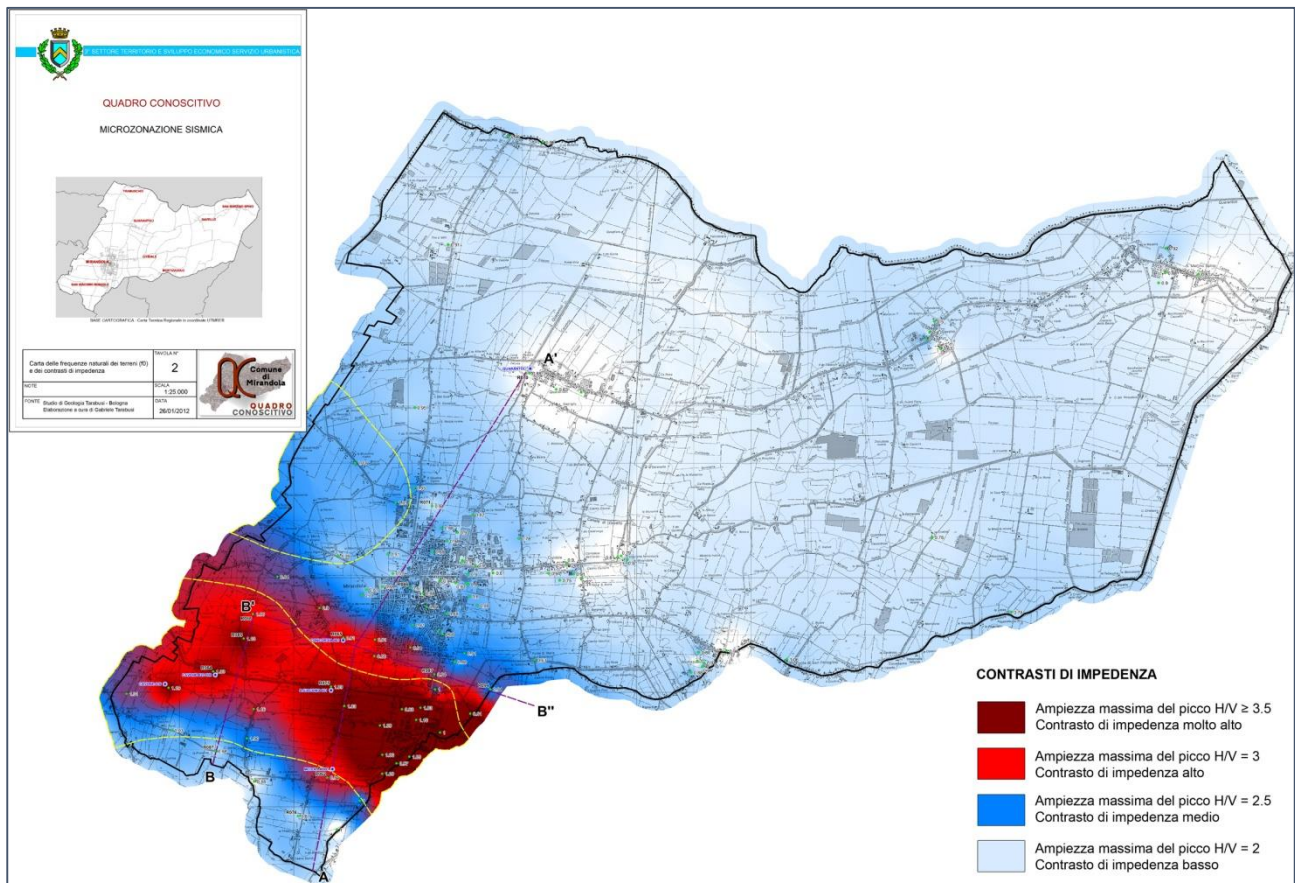


Figura 6-1 - Estratto della carta delle frequenze naturali dei terreni a scala comunale dello studio microzonazione sismica di secondo livello (Tarabusi, 2012) in cui sono evidenziate le aree caratterizzate da un diverso contrasto di impedenza.

6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (v. Allegato 1) è stato possibile associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute a scala regionale. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è rappresentata la sezione A-A' (Mirandola Sud-Quarantoli), a cui vengono ben correlati, in frequenza e ampiezza, i picchi H/V delle misure di microtremore a stazione singola realizzate lungo la stessa. A tale figura è possibile fare riferimento per una migliore comprensione di quanto dettagliato nei paragrafi successivi.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

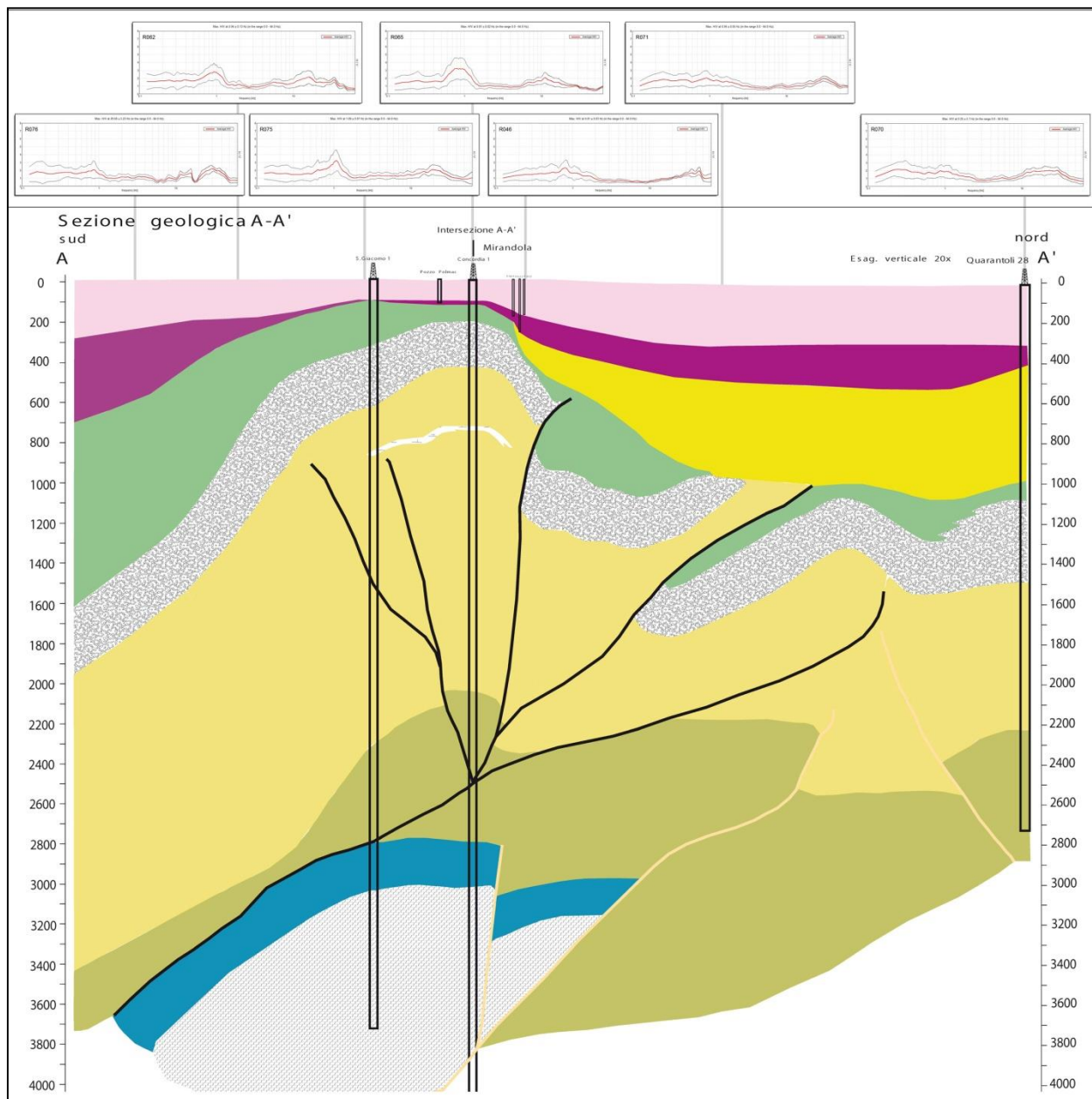


Figura 6-2 - Estratto della carta delle frequenze naturali dei terreni a scala comunale dello studio microzonazione sismica di secondo livello (Tarabusi, 2012), in cui è riportata la sezione A-A' (Martelli e Molinari 2008; traccia in Figura 6-2) a cui sono associate le curve del rapporto H/V, con picchi variabili in funzione della presenza o meno della culminazione dell'anticlinale di Mirandola.

6.2.1 Zona sud di Mirandola e frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni

Come dettagliato nei capitoli precedenti, nei bacini di avansfossa fortemente subsidenti, come la Pianura Padana a partire dal Pleistocene Medio, in corrispondenza delle culminazioni strutturali delle anticlinali per propagazione di faglia (*fault-propagation folds*), lo spessore dei depositi quaternari continentali è generalmente ridotto. Inoltre, questi depositi sono generalmente costituiti da successioni sedimentarie

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

condensate o addirittura con lacune stratigrafiche e, in questa regione, si sovrappongono direttamente alle unità marine plioceniche (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti et al., 2004), come ben evidenziato nelle sezioni geologiche riportate in allegato 1 (Martelli e Molinari, 2008). Tale passaggio litologico, tra depositi continentali relativamente recenti e poco addensati e unità plioceniche caratterizzate da una maggiore rigidità, dà origine ad un contrasto di impedenza elevato a causa del brusco aumento, sia della velocità delle onde sismiche, sia della densità del materiale. Tali condizioni meccaniche sono particolarmente adatte ad essere rilevate attraverso le analisi HVSR, che mostrano un picco in corrispondenza di tale interfaccia.

In particolare, quando la variazione litologica è rilevante e stratigraficamente ridotta a pochi metri, o anche meno, la curva H/V presenta un elevato e marcato picco di amplificazione. Come comunemente accettato in letteratura, la frequenza del picco di amplificazione è in prima approssimazione proporzionale alla velocità delle onde di taglio del sovrastante corpo sedimentario e all'inverso della profondità della discontinuità secondo la nota equazione di risonanza ($F = V_s/4h$; Castellaro *et al.*, 2005). In linea di principio, più alto è il picco, maggiore è il contrasto di impedenza tra i due strati, mentre più è stretto il picco (cioè caratterizzato da una piccola gamma di frequenze), più è netta la variazione litologica nella colonna stratigrafica.

In corrispondenza della culminazione assiale dell'anticlinale sepolta di Mirandola, nei casi di passaggio netto tra i depositi del Quaternario Continentale più soffici e quelli del Pliocene Inferiore più rigidi a profondità inferiori a 100 metri (ad esempio all'altezza del Pozzo San Giacomo visibile in sezione in Figura 6-2) si rilevano infatti picchi alti e stretti a frequenza in genere superiore a 1Hz (figura 6-3) ed è sempre rispettata anche la seconda parte dei criteri SESAME (AA.VV., 2004) per l'identificazione di un picco principale univoco.

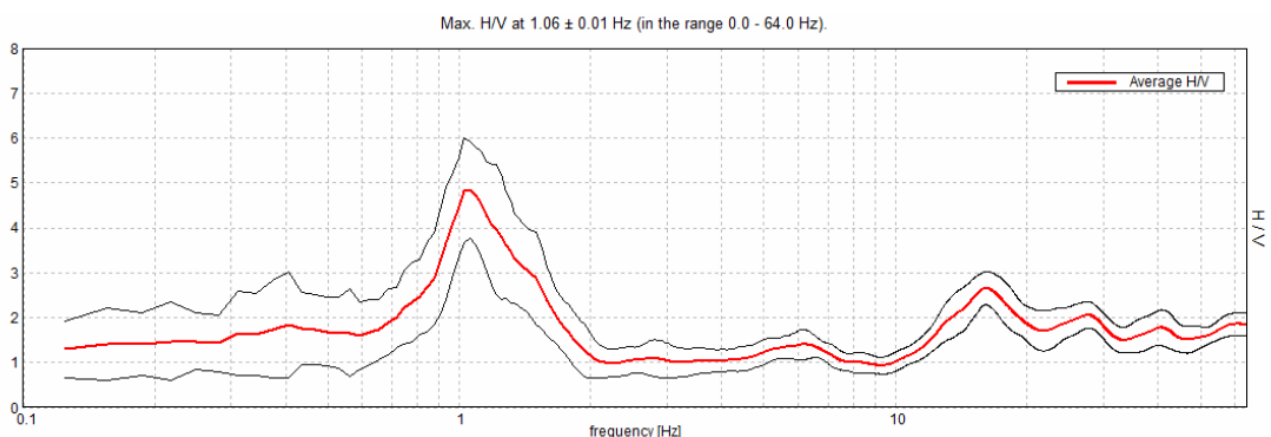


Figura 6.3 - Indagine 036022P404HVS413. Esempio di picco stretto e molto alto, che evidenzia la presenza di un elevato contrasto di impedenza originato da una netta discontinuità stratigrafica (es. tra Quaternario Continentale e Pliocene Inferiore).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Nell'area di studio, in diversi settori comunque direttamente influenzati dagli effetti dell'anticlinale sepolta, si può invece rinvenire uno spessore relativamente ridotto di depositi definiti in letteratura quaternario marino (anche solo 20-30 m), interposto tra la sovrastante successione sedimentaria continentale 'condensata' e le unità plioceniche (visibile in sezione in Figura 6-2). In questo contesto geologico, in cui il tetto dei depositi pliocenici risulta comunque a profondità superiori a 100 metri, il contrasto di impedenza è in qualche modo distribuito o, eventualmente, suddiviso tra più di una superficie. In casi come questo è noto in letteratura che l'analisi HVSR mostra due picchi ravvicinati o uno relativamente largo (Castellaro *et al.*, 2005) a frequenze di solito di poco inferiori a 1Hz (Figura 6-4). In genere in tale contesto, come è logico attendersi, non risulta rispettata la seconda parte dei criteri SESAME (AA.VV., 2004) per l'identificazione di un picco principale univoco.

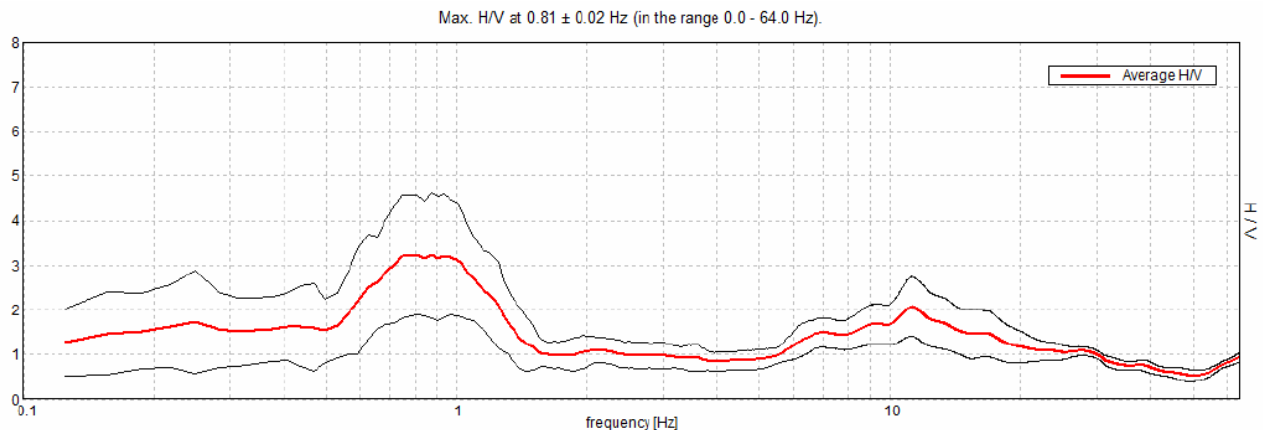


Figura 6.4 - Indagine 036022P409HVSR418. Esempio di picco largo e alto, che evidenzia la presenza di un marcato contrasto di impedenza originato da discontinuità stratigrafiche ravvicinate. Probabilmente un ridotto spessore di depositi del quaternario marino è interposto tra Quaternario Continentale e Pliocene Inferiore.

6.2.2 Zona centro-nord di Mirandola e altre frazioni

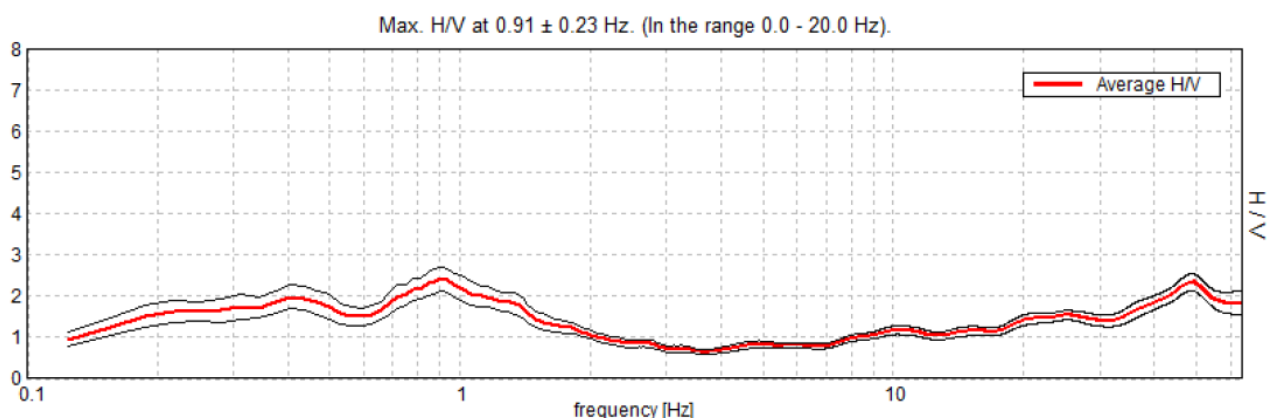
Rispetto a quanto si qui visto per le aree più direttamente influenzate dalla presenza dell'anticlinale sepolta (zona meridionale del capoluogo comunale e frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni), nella restante porzione del territorio comunale di Mirandola, i picchi di H/V risultano meno evidenti e meno immediatamente correlabili con una stratigrafia maggiormente continua e caratterizzata da passaggi stratigrafici e salti di velocità meno netti. In queste aree, in analogia con quanto riscontrato in altri recenti studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (comuni di Cento, Mirabello e Sala Bolognese) è possibile correlare il picco a più alta frequenza, che spesso rappresenta anche quello a maggiore ampiezza, con la base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1) che corrisponde alla base del Subsistema 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 MIRANDOLA

L'andamento e la posizione stratigrafica di tale superficie, evidenziati nelle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1), sono stati ricostruiti mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi. Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili anche in aree vicine, la profondità della suddetta superficie può variare tra gli 80 e i 100 m circa e determina il moderato contrasto di impedenza individuato dalla maggior parte delle misure di microtremore eseguite al di fuori dell'area di anticlinale, che registrano un primo picco a frequenza di poco inferiore a 1 Hz. Tali valori risultano confermati dalla relazione che lega le frequenze fondamentali dei terreni, desunte da analisi di sismica passiva, con le velocità delle onde di taglio disponibili e la profondità di un dato contrasto di impedenza.

La base del Subsistema di Bazzano non può, però, essere considerata 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 della successione del Quaternario superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di V_s in media inferiori ai 400 m/s, e quindi non compatibili con quelli caratteristici del "*bedrock sismico*" di riferimento per analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associato a frequenze di picco più basse.

Diverse misure di microtremore eseguite nel Comune di Mirandola, specie quelle a maggiore durata ed analizzate con più ampie finestre temporali, mostrano anche un secondo picco, in genere meno marcato, a frequenze inferiori (variabili tra 0,35 e 0,6 Hz), come esemplificato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** In base ai dati stratigrafici disponibili e ai valori di V_s profondi per analoghe unità stratigrafiche della pianura emiliana (Minarelli *et al.*, 2016), si può ragionevolmente supporre che il picco a più bassa frequenza corrisponda al passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici, i quali anche in quest'area rappresenterebbero il bedrock sismico.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Figura 6.5 - Indagine 036022P875HVSR910. Esempio di misura che mostra un picco principale a frequenza poco inferiore a 1 Hz, che evidenzia un primo contrasto di impedenza correlabile con la base del Subsistema di Bazzano (AES6) e un secondo picco a frequenza di poco superiore a 0,4 Hz correlabile col passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici.

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

Una delle principali criticità che interessa il territorio comunale di Mirandola è legata alla presenza diffusa di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione.

La manifestazione in superficie di effetti di sito legati a fenomeni di liquefazione è stata documentata, in occasione del sisma del 2012, anche in alcune aree del territorio del comune di Mirandola sebbene in modo meno diffuso ed evidente rispetto a quanto osservato in altre località (Figura 2-6), mentre la presenza di condizioni predisponenti a tali fenomeni è stata accertata per ampie aree costituenti gli ambiti urbanizzati ed urbanizzabili.

Gli studi realizzati durante la fase di emergenza dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013), confermando quanto stabilito dalla microzonazione sismica di secondo livello (Tarabusi, 2012), hanno accertato la presenza di terreni aventi caratteristiche predisponenti la liquefazione in tutto il territorio indagato. L'intero territorio oggetto di studio nel comune di Mirandola è infatti interessato dalla presenza di Zone di Attenzione per Liquefazione nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Martelli e Romani, 2013). Tale determinazione cautelativa, fatta nel 2013, si basava su due fattori: (i) la presenza in tutto il territorio a profondità variabili, ma comunque inferiori ai 20 metri, di depositi sabbiosi del fiume Po; (ii) la disponibilità di numerose prove penetrometriche meccaniche (CPT) a fronte di uno scarso numero di prove penetrometriche con piezocono (CPTU). Quest'ultimo fattore in particolare, non aveva permesso di calcolare un sufficiente numero di indici di liquefazione affidabile, suggerendo un approccio cautelativo.

Il presente studio di microzonazione di terzo livello ha invece potuto avvalersi di un elevato numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTU) eseguite per lo più a supporto degli interventi di ricostruzione post-sisma e raccolte nella banca dati, a cui si sono aggiunte 12 prove analoghe realizzate specificamente per il presente studio e ubicate nelle aree meno con meno dati di repertorio. Di molte delle indagini di repertorio è stato possibile recuperare i dati penetrometrici numerici attraverso i quali si sono potute eseguire 182 affidabili analisi puntuali del rischio liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (paragrafo 7.2.1), complessivamente ben distribuite in tutto il territorio comunale.

L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale e attraverso la correlazione con altre tipologie di indagini, ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni, ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.6).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Rispetto a quanto stabilito nelle fasi precedenti (Tarabusi, 2012; Martelli e Romani, 2013) gli approfondimenti di terzo livello compiuti per il presente studio di microzonazione hanno dunque ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi potenzialmente liquefacibili, permettendo di distinguere aree a diverso rischio di liquefazione e di identificare ridotte porzioni di territorio in cui tale rischio può essere escluso.

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 nelle aree meno documentate da prove geognostiche, che nel caso specifico sono generalmente confinate in zone rurali o comunque poco densamente abitate.

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 territorio, 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 dunque basata sia sulla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, sia sulle informazioni estratte dalle sezioni geologiche semplificate prodotte per la Regione Emilia-Romagna in occasione del sisma 2012.

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

L'evoluzione e la conformazione geologica del territorio, oltre alle osservazioni sugli effetti di sito compiute nelle aree colpite dagli eventi sismici del 2012, 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 aree definite come instabili sono pertanto state eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione mediante metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale, applicate e verificate in contesti deposizionali analoghi in seguito agli eventi sismici del 2012.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

Gli eventi sismici del 2012 hanno permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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, con risultati di maggiore dettaglio, 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 confrontati con i fattori di amplificazione sismica proposti dai nuovi (D.G.R. 2193/2015) e vecchi (D.A.L. 112/2007) abachi regionali, 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 dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili e considerando l'andamento del *bedrock sismico* nell'area di studio (paragrafo 6.2), sono state eseguite diverse modellazioni numeriche di risposta sismica locale, anche a partire da quelle già realizzate a supporto del PSC del 2015 (Tarabusi, 2015). I risultati di tutte le modellazioni eseguite all'interno dell'area comunale possono essere sostanzialmente ricondotti a 2 tipologie di risposte sismiche, una valida per le zone in cui è marcata l'influenza dell'alto strutturale e una valida per tutte le restanti. Sulla base di queste risultanze sono quindi stati modellati, a supporto del presente studio, due siti "tipo" per i quali si dispone dei dati più accurati per la definizione del modello sismo-stratigrafico in profondità (Tabella 7-1). Le modellazioni sono state denominate:

- RSL1 (Tabella 7-), valida per la zona di "alto" stratigrafico (anticlinale) che interessa la porzione meridionale del capoluogo comunale e le frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni (paragrafo 6.2.1), caratterizzate da un *bedrock sismico* più superficiale, a profondità compresa tra 80 e 150 metri;
- RSL2 (Tabella 7-), per la zona di "basso" stratigrafico che interessa la porzione centro-settentrionale del capoluogo comunale e le restanti frazioni (paragrafo 6.2.1) caratterizzate da un *bedrock sismico* più profondo, a profondità variabile tra 250 e 500 metri.

In Figura 7-1 sono distinte le aree del territorio comunale per cui risultano valide le due diverse modellazioni eseguite.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

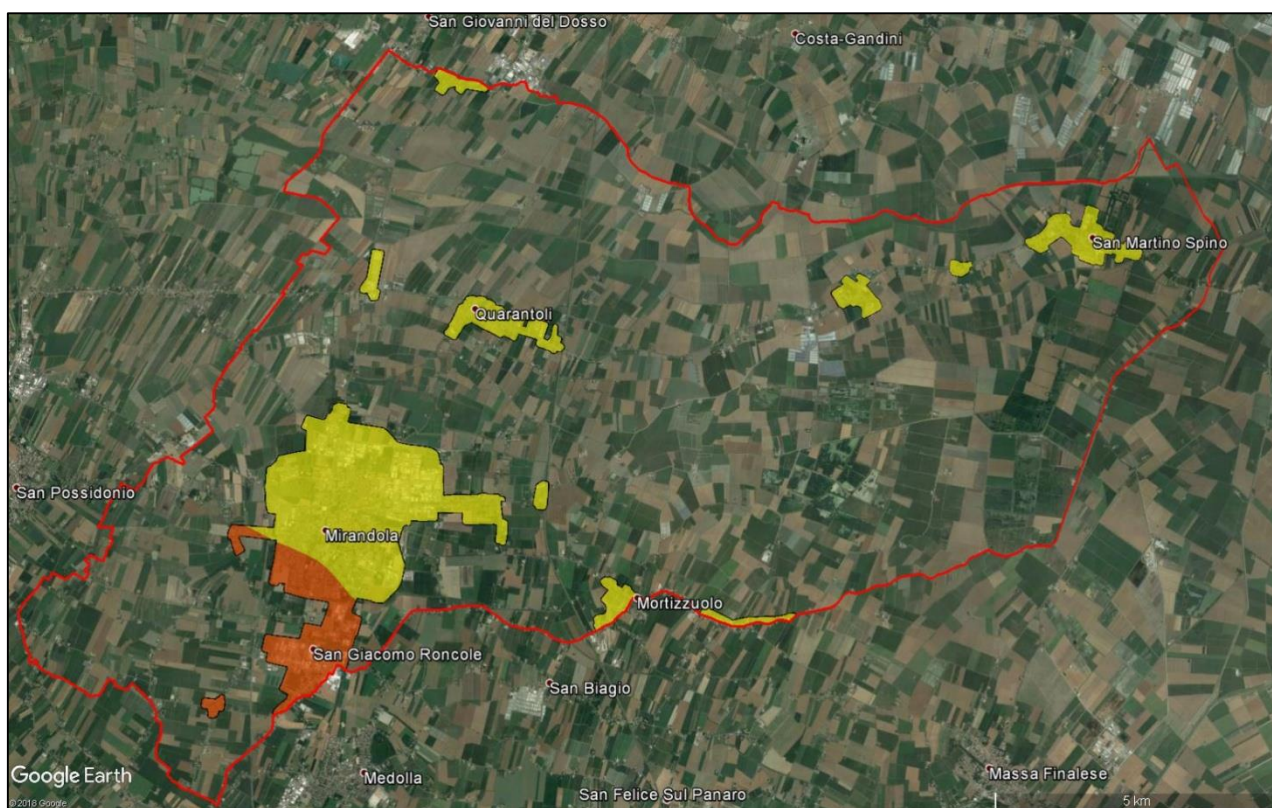


Figura 7-1 - Aree del comune di Mirandola oggetto della microzonazione sismica a cui sono associate le due diverse modellazioni di risposta sismica locale: RSL1 in arancione e RSL2 in giallo.

I modelli ricostruiti per il presente studio si basano sui risultati di indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio eseguite per la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo e fino al bedrock sismico per la sola RSL1. Le unità stratigrafiche più profonde, presenti nella RSL2, sono state invece descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale attraverso il confronto con sezioni 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 mediante misure dirette (*cross-hole*, coni sismici e ESAC) o da letteratura (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 da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati o da indagini in situ con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014), eseguite a supporto degli studi realizzati durante la fase di emergenza post-sismica dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013), o di quelli più recenti di terzo livello eseguiti in altri comuni della Pianura emiliana, oppure ricavate da dati di letteratura (per i livelli più sabbiosi); (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in situ e di laboratorio disponibili.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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

	RSL1	RSL2
Descrizione	ALTO STRATIGRAFICO Mirandola sud, San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni	BASSO STRATIGRAFICO Mirandola centro-nord e altre frazioni
Stratigrafia superficiale	036022P829S847	036022P837CPTU866 (fino a 28 metri)
Stratigrafia in profondità	036022P829S847	Sezione A-A'
Bedrock sismico	036022P829S847, Sezioni A-A' e B-B' e 036022P232HVSR236	Sezione A-A' e 036022P875HVSR910
VS superficiale	036022P829DH857	036022P837SCPT877 (fino a 28 metri) e 036022P849ESAC_SPAC884
VS in profondità	036022P829DH857	036022P849ESAC_SPAC884 (fino a 60 metri) e correlazione con CH Mirandola e DH Mirabello (Minarelli <i>et al.</i> , 2016)

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

La correlazione tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), e curve H/V ottenute da tramite misure di microtremore realizzate per il presente studio (paragrafo 6.1), hanno permesso di individuare i maggiori contrasti di impedenza e stimare la profondità e la natura della bedrock sismico anche in corrispondenza di RSL2 dove non è stato direttamente raggiunto (paragrafi 5.1 e 6.2). Sulla base di tali analisi il bedrock, posto in corrispondenza della base dei depositi del Quaternario Marino (QM) - tetto dei depositi del Pliocene, è stato assunto ad una profondità pari a 117 m per la modellazione relativa alle zone di alto stratigrafico (RSL1, Tabella 7-) e di 400 m per quella relativa alle zone di basso stratigrafico (RSL2, Tabella 7-3).

Nel caso della 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 *cross-hole* profondo in corrispondenza di RSL1 e di *down-hole* profondo, durante lo studio di microzonazione di terzo livello del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016). L'extrapolazione dei dati di zone diverse all'area modellata in RSL2 è stata possibile seguendo la metodologia proposta da Minarelli *et al.*, 2016, considerando che i territori indagati si inquadrano nel medesimo contesto geologico-strutturale che determina la presenza delle stesse unità stratigrafiche appartenenti al Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'extrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono stati considerati opportune correzioni nei valori di Vs legati al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Per stimare il più correttamente possibile la velocità sismica del bedrock in corrispondenza di RSL2, è stato infine assunto un valore sufficientemente elevato per poter riprodurre l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSR (paragrafo 6.1). In Tabella 7- e Tabella 7- sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti, rispettivamente per RSL1 e RSL2.

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0.00	2.00	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	170.00
2.00	3.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	175.00
5.00	3.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	185.00
8.00	1.00	Centocentro (8.5-9) - AL	195.00
9.00	3.00	Mirabello SDMT - Sf + L	205.00
12.00	11.00	Idriss 1990 - Sabbie	215.00
23.00	2.00	Idriss 1990 - Sabbie	230.00
25.00	7.00	Idriss 1990 - Sabbie	275.00
32.00	4.00	Idriss 1990 - Sabbie	305.00
36.00	14.00	Idriss 1990 - Sabbie	335.00
50.00	2.00	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	315.00
52.00	5.00	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	350.00
57.00	2.00	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	410.00
59.00	5.00	Idriss 1990 - Sabbie	400.00
64.00	3.00	Idriss 1990 - Sabbie	400.00
67.00	6.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	350.00
73.00	2.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	375.00
75.00	7.00	Idriss 1990 - Sabbie	425.00
82.00	5.00	Idriss 1990 - Sabbie	440.00
87.00	7.00	Idriss 1990 - Sabbie	385.00
94.00	2.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	425.00
96.00	3.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	515.00
99.00	3.00	Idriss 1990 - Sabbie	525.00
102.00	6.00	Idriss 1990 - Sabbie	425.00
108.00	4.00	Idriss 1990 - Sabbie	475.00
112.00	3.00	Idriss 1990 - Sabbie	550.00
115.00	2.00	Idriss 1990 - Sabbie	625.00
117.00	Half-Space	Bedrock	850.00

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0.00	1.00	Cento Centro (8.5-9) - AL	140.00
1.00	8.00	San Carlo S10 C2 - SL deb.A - ISMGEO	200.00
9.00	4.00	Cento Centro (8.5-9) - AL	185.00
13.00	6.00	Mirabello SDMT - Sf + L	250.00
19.00	3.00	Mirabello SDMT - Sf + L	300.00
22.00	24.00	Idriss 1990 - Sabbie	285.00
46.00	15.00	Idriss 1990 - Sabbie	380.00
61.00	15.00	Idriss 1990 - Sabbie	425.00
76.00	15.00	Idriss 1990 - Sabbie	430.00
91.00	29.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440.00
120.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	530.00
150.00	15.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500.00
165.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	505.00
195.00	15.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	505.00
210.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	510.00
240.00	15.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	510.00
255.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	515.00
285.00	15.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	515.00
300.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	680.00
330.00	30.00	Idriss 1990 - Sabbie	690.00
360.00	40.00	Idriss 1990 - Sabbie	700.00
400.00	Half-Space	Bedrock	1200.00

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

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7- e Tabella 7-), 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 2 singoli modelli di risposta sismica locale, che possono essere considerati rappresentativi delle 2 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).

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 è stato assunto pari a 0,145 g per RSL1 (Figura 7-2) e 0,140 g per RSL2, in considerazione dei valori medi tra quelli dei punti più prossimi, ricadenti nel territorio del Comune di Mirandola o nel suo immediato intorno.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

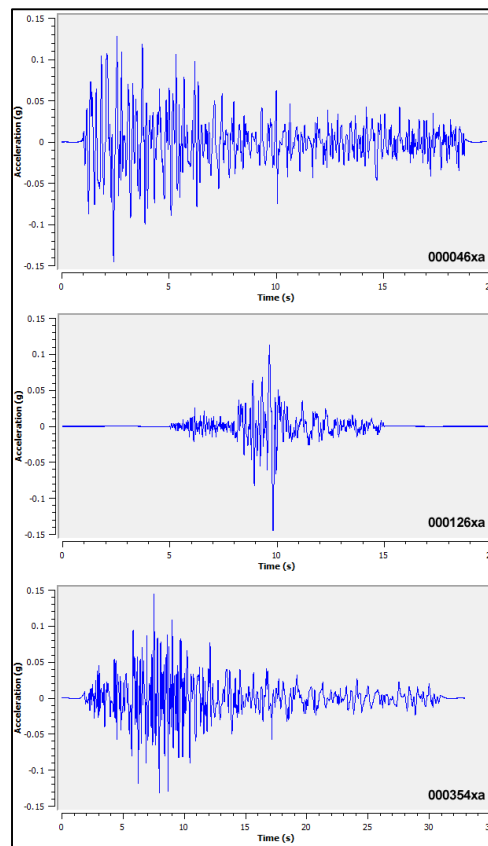


Figura 7-2 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una a_{ref} pari a 0,145 e utilizzati come input per la simulazione numerica della risposta sismica locale RSL1.

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 MIRANDOLA

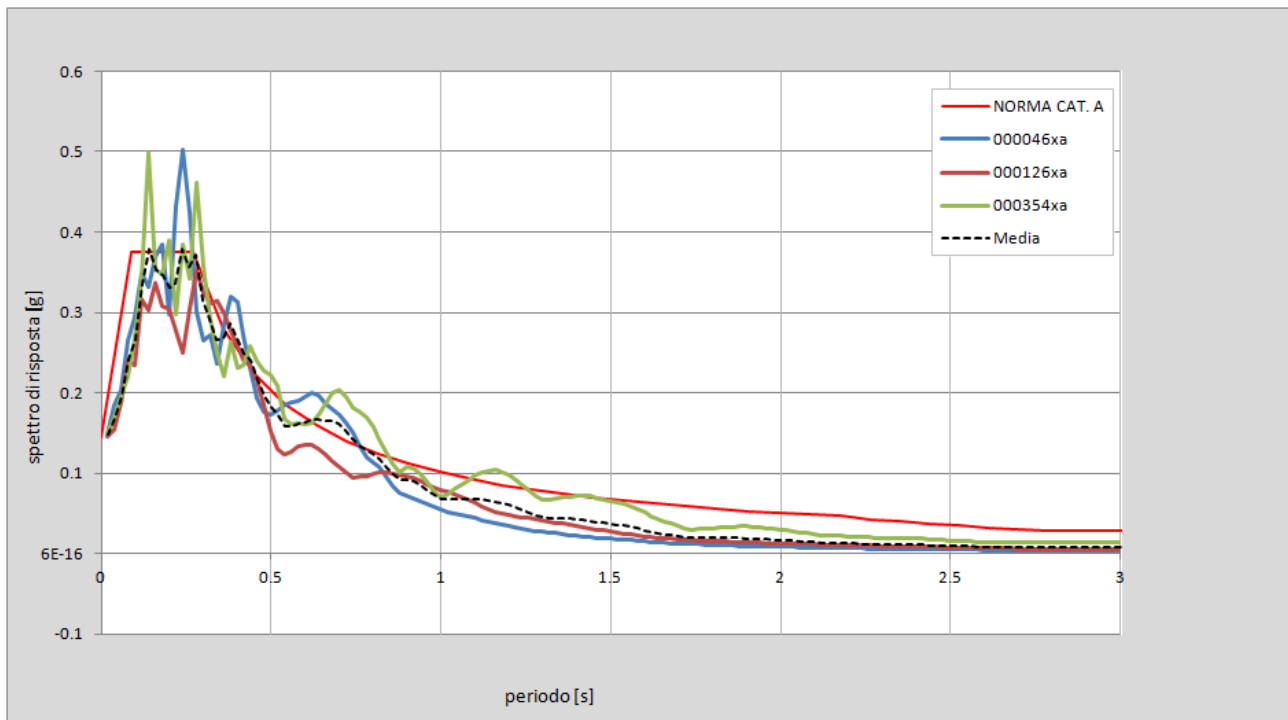


Figura 7-3 - RSL1: spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2008.

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 una frequenza di circa 0,85 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 MIRANDOLA

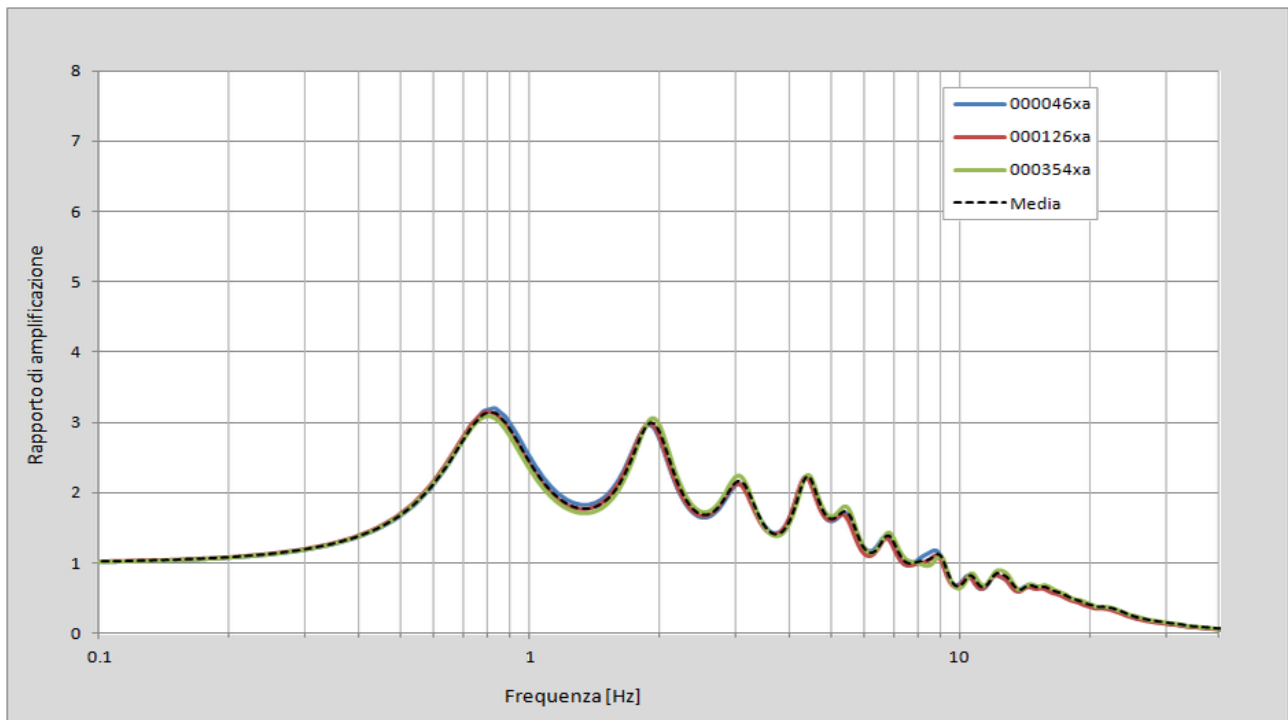


Figura 7-4 - RSL1: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 segnali di Figura 7-2 e per la loro media.

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 MIRANDOLA

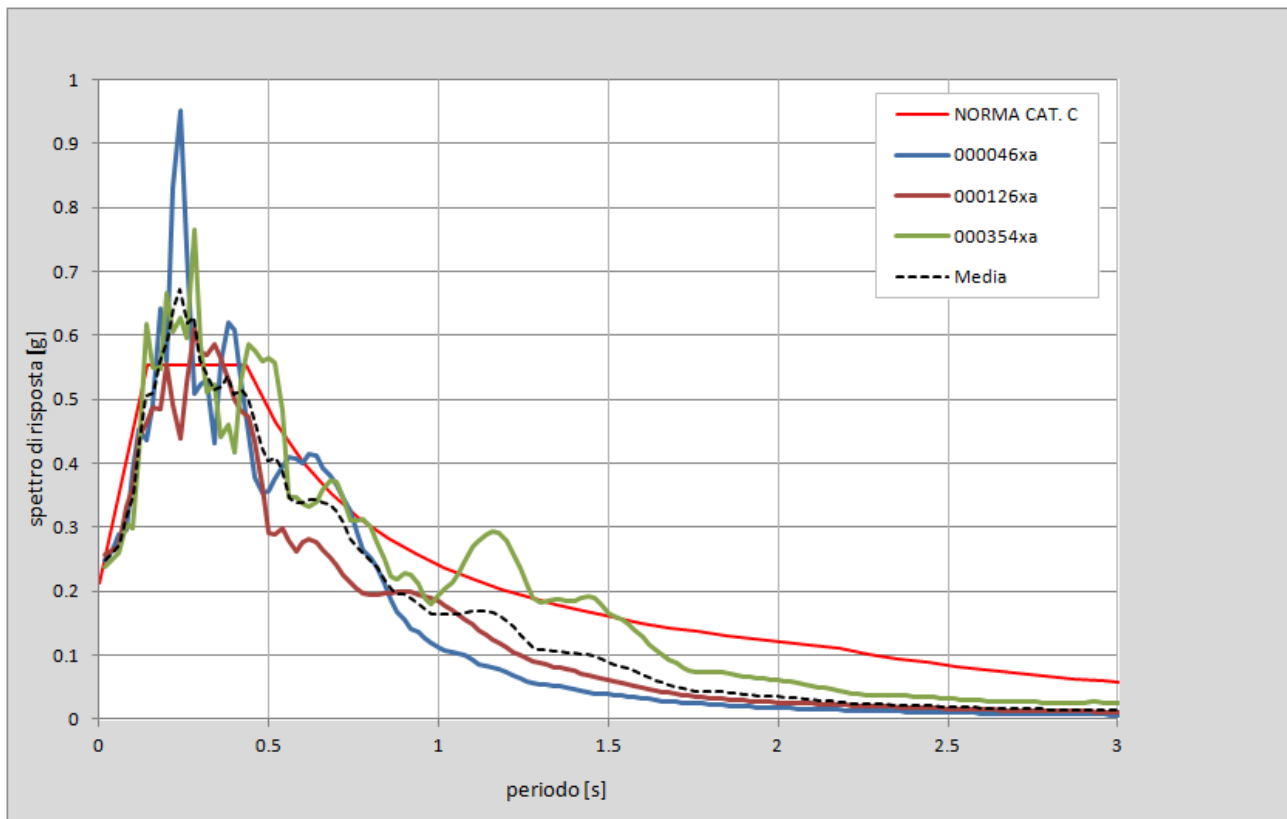


Figura 7-5 - RSL1: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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 MIRANDOLA

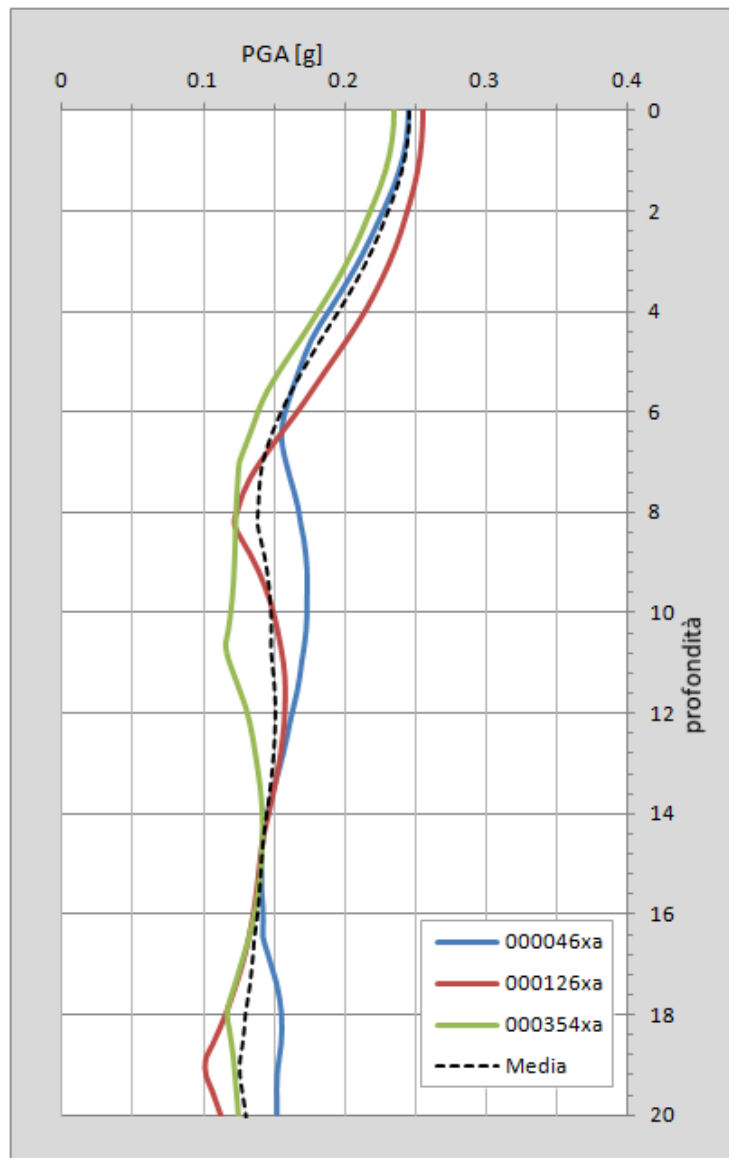


Figura 7-6 - RSL1: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,25 g (Figura 7-6) si ottiene un fattore di amplificazione **FA(PGA) = 1,7**.

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:

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

$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.1$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.2$$

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 una frequenza di circa 0,35 Hz e una a circa 0,9 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.

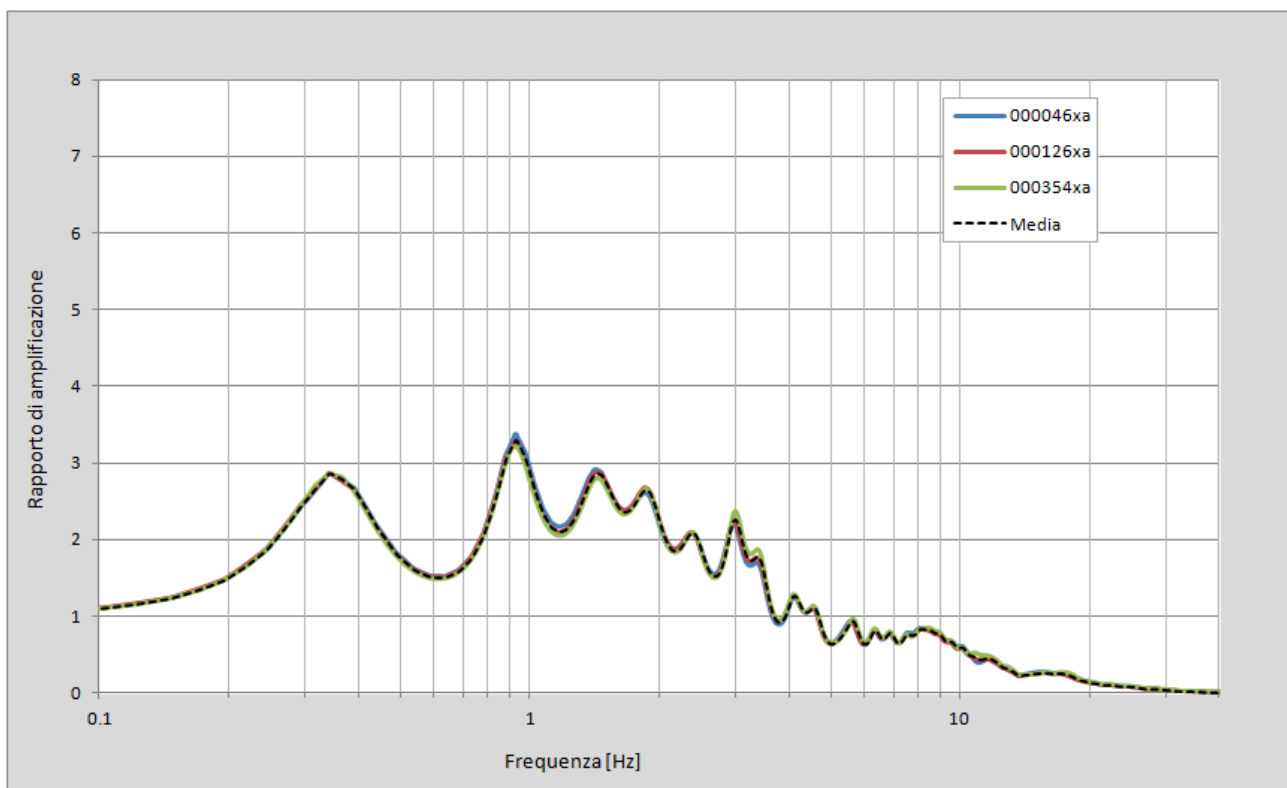


Figura 7-7 - RSL2: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

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, opportunamente scalati, 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 MIRANDOLA

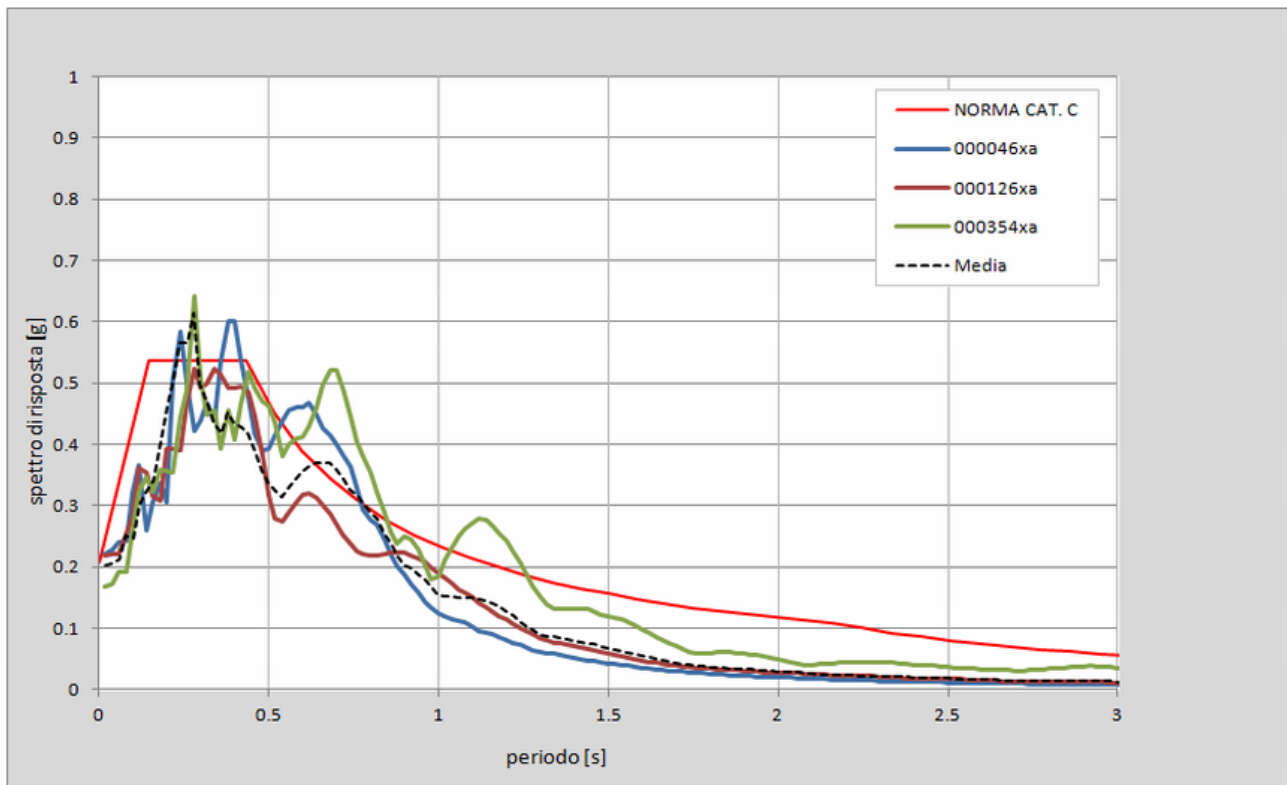


Figura 7-8 - RSL2: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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 MIRANDOLA

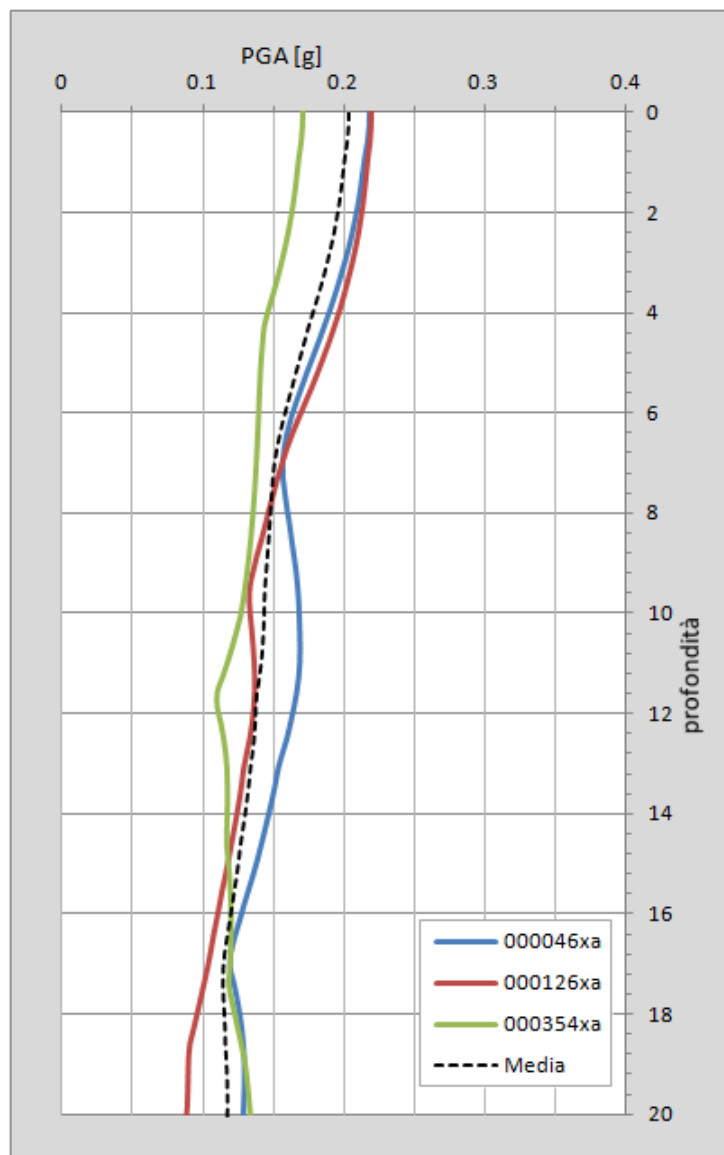


Figura 7-9 - RSL2: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,20 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione **FA(PGA) = 1,5**.

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:

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

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

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

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 Mirandola, 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) in base ai risultati delle nuove indagini geognostiche raccolte e realizzate ad hoc per gli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state infine 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, raccolte e realizzate durante lo studio di microzonazione sismica.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Già durante gli studi relativi all'Ordinanza 70/2012, furono effettuate stime del potenziale di liquefazione su un numero consistente di indagini penetrometriche (v. Allegato 1.7 - Ordinanza 70/2012) mediante diverse procedure semplificate indicate degli 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 tra quelli all'epoca disponibili, 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 vennero 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 più recente metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015. Tale metodo ha fornito indici di liquefazione mediamente più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss e Boulanger, 2008; Robertson NCEER, 2001 e Robertson, 2009).

Considerato il metodo di Boulanger e Idriss (2014) mediamente più affidabile dei precedenti, in quanto basato su di un set più numeroso di dati, si è scelto di utilizzarlo come riferimento per la stima del potenziale di liquefazione.

Sono state quindi analizzate 182 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica e piezocono (CPTU) distribuite come riportato nella cartografia di terzo livello (Tavola 6, 7, 8 e 9).

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-. Il valore di M_{wmax} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre la PGA è stata derivata moltiplicando l'agref (così come definita al paragrafo 7.1.1) per i fattori ottenuti dalla risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1) cioè:

- $0,145 \times 1,7 = 0,25$ per le zone di "alto" stratigrafico - anticlinale (Mirandola sud, San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni);
- $0,14 \times 1,5 = 0,21$ per le zone di "basso" stratigrafico (Mirandola centro-nord e altre frazioni).

In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, il valore di soggiacenza adottato è stato considerato maggiormente cautelativo rispetto a quello medio misurato nel corso delle indagini geognostiche eseguite per la microzonazione.

Parametri	M_{wmax}	PGA	Falda
Zona di alto (RSL1)	6,14	0,25	1 m
Zona di basso (RSL2)	6,14	0,21	1 m

Tabella 7-4 - Parametri di input per la verifica puntuale del potenziale di liquefazione col metodo di Boulanger e Idriss (2014).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 ($2 < I_L \leq 5$), alto ($5 < I_L \leq 15$) e molto alto ($I_L > 15$).

In Tabella 7- sono riportati i valori di I_L relativi a tutte le 182 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello e in grassetto sono evidenziate le righe relative alle prove CPTU realizzate a supporto del presente studio di microzonazione di sismica. I rapporti di calcolo delle verifiche a liquefazione eseguite su queste ultime prove sono riportati nell'Allegato 3.

Codice	Lat.	Lon.	Ag	IL Boulanger e Idriss (2014)
036022P3CPTU3	44.9507	11.0661	1.5	1.2
036022P4CPTU4	44.9506	11.0662	1.5	1.2
036022P5CPTU5	44.9581	11.0872	1.5	8
036022P33CPTU34	44.9024	11.043	1.5	2.6
036022P34CPTU35	44.9026	11.043	1.5	3.6
036022P35CPTU36	44.9141	11.0431	1.5	2.7
036022P36CPTU37	44.914	11.0433	1.5	3.5
036022P53CPTU55	44.9196	11.1132	1.5	5.8
036022P68CPTU70	44.8876	11.0544	1.5	4
036022P69CPTU72	44.8789	11.0779	1.5	1.2
036022P248CPTU252	44.874	11.0299	1.7	1.7
036022P249CPTU253	44.8725	11.0325	1.7	4.3
036022P250CPTU254	44.8716	11.0364	1.7	2
036022P251CPTU255	44.8752	11.0268	1.7	4
036022P252CPTU256	44.886	11.0168	1.7	4.6
036022P253CPTU257	44.8831	11.0181	1.7	2.7
036022P254CPTU258	44.8832	11.0187	1.7	3
036022P255CPTU259	44.8828	11.0175	1.7	2.2
036022P256CPTU260	44.8809	11.017	1.7	4.8
036022P257CPTU261	44.8805	11.019	1.7	6.1
036022P258CPTU262	44.8775	11.0228	1.7	4.3
036022P259CPTU263	44.877	11.0231	1.7	4.4
036022P260CPTU264	44.8751	11.0273	1.7	2.9
036022P261CPTU265	44.875	11.0279	1.7	3.9
036022P262CPTU266	44.8746	11.0283	1.7	4
036022P263CPTU267	44.871	11.0389	1.7	0.6
036022P264CPTU268	44.8705	11.0428	1.7	2
036022P265CPTU269	44.8699	11.0483	1.7	2.8
036022P267CPTU271	44.8696	11.0539	1.7	2.2
036022P268CPTU272	44.8693	11.058	1.7	4.4

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

036022P269CPTU273	44.8693	11.0613	1.7	7.9
036022P270CPTU274	44.869	11.0612	1.7	7.4
036022P271CPTU275	44.8688	11.0643	1.7	3.7
036022P272CPTU276	44.8685	11.0668	1.7	20.4
036022P273CPTU277	44.8683	11.0693	1.7	5.7
036022P274CPTU278	44.8684	11.0703	1.7	11.6
036022P275CPTU279	44.8686	11.0716	1.7	7.6
036022P276CPTU280	44.8688	11.0732	1.7	11.2
036022P277CPTU281	44.8693	11.0758	1.7	7.6
036022P278CPTU282	44.8702	11.0492	1.7	3.3
036022P279CPTU283	44.8683	11.0665	1.7	10
036022P280CPTU284	44.8933	11.0653	1.5	3.8
036022P281CPTU285	44.8908	11.0699	1.5	6.3
036022P282CPTU286	44.8908	11.07	1.5	4.8
036022P283CPTU287	44.8909	11.0697	1.5	2.4
036022P284CPTU288	44.8908	11.0697	1.5	2.3
036022P287CPTU291	44.8663	10.9997	1.7	2.2
036022P288CPTU292	44.8661	10.9999	1.7	2.9
036022P289CPTU293	44.8588	11.0347	1.7	2.2
036022P325CPTU329	44.8923	11.1113	1.5	6
036022P346CPTU350	44.9012	11.0687	1.5	5
036022P354CPTU359	44.9185	11.1022	1.5	2
036022P358CPTU364	44.9267	11.1796	1.5	9.9
036022P359CPTU366	44.9331	11.231	1.5	0.4
036022P369CPTU377	44.8624	11.0564	1.7	4.2
036022P439CPTU448	44.8901	11.0942	1.5	4.3
036022P440CPTU450	44.8748	11.1278	1.5	2.9
036022P567CPTU578	44.8887	11.0686	1.5	4.8
036022P585CPTU596	44.8856	11.0624	1.5	2.9
036022P586CPTU597	44.8856	11.0623	1.5	3.8
036022P595CPTU607	44.9048	11.0665	1.5	6
036022P606CPTU618	44.8892	11.0592	1.5	6.3
036022P607CPTU619	44.8893	11.0596	1.5	6.1
036022P616CPTU628	44.935	11.2373	1.5	1.9
036022P628CPTU640	44.8727	11.1249	1.5	4.5
036022P629CPTU641	44.8727	11.1244	1.5	5.2
036022P673CPTU685	44.8758	11.1709	1.5	1.9
036022P675CPTU687	44.8919	11.1015	1.5	5.9
036022P676CPTU688	44.8923	11.1021	1.5	2.1
036022P724CPTU737	44.8901	11.1012	1.5	5.2
036022P725CPTU738	44.8899	11.1011	1.5	5.9
036022P732CPTU745	44.9357	11.2332	1.5	5.2

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

036022P739CPTU752	44.8544	11.0385	1.7	1.4
036022P740CPTU753	44.8547	11.0387	1.7	0.2
036022P752CPTU765	44.9027	11.0581	1.5	4.4
036022P754CPTU767	44.8877	11.064	1.5	2.4
036022P796CPTU810	44.8628	11.0624	1.7	19
036022P808CPTU823	44.8636	11.0443	1.7	9.9
036022P813CPTU829	44.8893	11.0669	1.5	6.2
036022P826CPTU843	44.9106	11.2234	1.5	4.7
036022P832CPTU852	44.8633	11.0612	1.7	5.9
036022P833CPTU853	44.8634	11.0616	1.7	8.9
036022P837CPTU866	44.9001	11.0765	1.5	15.3
036022P838CPTU867	44.8985	11.0815	1.5	2.4
036022P839CPTU868	44.9347	11.2326	1.5	3.9
036022P840CPTU869	44.9326	11.2333	1.5	17.4
036022P841CPTU870	44.9351	11.237	1.5	1.3
036022P842CPTU871	44.8942	11.059	1.5	8.9
036022P843CPTU872	44.8828	11.0792	1.5	0.5
036022P844CPTU873	44.8803	11.0783	1.5	0.4
036022P845CPTU874	44.8969	11.0877	1.5	5.2
036022P846CPTU875	44.8886	11.0957	1.5	1.4
036022P847CPTU876	44.8916	11.1108	1.5	11.3
036022P853CPTU888	44.8954	11.095	1.5	8.9
036022P854CPTU889	44.8954	11.0946	1.5	14.1
036022P855CPTU890	44.8954	11.055	1.5	1.7
036022P856CPTU891	44.8954	11.0552	1.5	1.6
036022P857CPTU892	44.9511	11.0688	1.5	1.4
036022P858CPTU893	44.9513	11.0693	1.5	1.7
036022P859CPTU894	44.951	11.0693	1.5	3.3
036022P860CPTU895	44.927	11.1805	1.5	4.9
036022P861CPTU896	44.927	11.1809	1.5	3.4
036022P862CPTU897	44.9169	11.1515	1.5	6.3
036022P863CPTU898	44.883	11.1175	1.5	1.2
036022P864CPTU899	44.8722	11.1246	1.5	4.3
036022P865CPTU900	44.9254	11.1807	1.5	3.2
036022P866CPTU901	44.8642	11.0175	1.7	3.7
036022P867CPTU902	44.864	11.0175	1.7	6.6
036022P868CPTU903	44.8641	11.0173	1.7	4.9
036022P869CPTU904	44.9064	11.1165	1.5	5
036022P870CPTU905	44.9066	11.1167	1.5	4.3
036022P871CPTU906	44.8862	11.0377	1.7	7.5
036022P872CPTU907	44.8628	11.0443	1.7	9.7
036022P885CPTU920	44.8921	11.0736	1.5	2.7

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

036022P886CPTU921	44.8927	11.0753	1.5	2.4
036022P887CPTU922	44.894	11.0749	1.5	8.6
036022P888CPTU923	44.8938	11.0761	1.5	8.2
036022P889CPTU924	44.895	11.0742	1.5	4
036022P890CPTU925	44.895	11.0764	1.5	9.3
036022P893CPTU928 (CPTU1)	44.891	11.0575	1.5	2.4
036022P894CPTU929 (CPTU2)	44.888	11.0716	1.5	8.7
036022P895CPTU930 (CPTU3)	44.8899	11.1002	1.5	8.8
036022P896CPTU931 (CPTU4)	44.8776	11.0567	1.7	7.2
036022P897CPTU932 (CPTU5)	44.8818	11.0611	1.7	3
036022P898CPTU933 (CPTU6)	44.8593	11.0394	1.7	5.9
036022P899CPTU934 (CPTU7)	44.8601	11.0572	1.7	6.6
036022P900CPTU935 (CPTU8)	44.9194	11.0969	1.5	3.5
036022P901CPTU936 (CPTU9)	44.9234	11.0958	1.5	2.3
036022P902CPTU937 (CPTU10)	44.938	11.2258	1.5	1.3
036022P903CPTU938 (CPTU11)	44.8771	11.1269	1.5	3.1
036022P904CPTU939 (CPTU12)	44.93	11.2023	1.5	2.3
036022P905CPTU940	44.8893	11.0644	1.5	4.6
036022P906CPTU941	44.8871	11.0647	1.5	2.4
036022P907CPTU942	44.8884	11.0657	1.5	2.1
036022P908CPTU943	44.8978	11.0837	1.5	7.8
036022P909CPTU944	44.8964	11.0812	1.5	7
036022P910CPTU945	44.9388	11.1067	1.5	3.5
036022P911CPTU946	44.9335	11.2409	1.5	4.2
036022P912CPTU947	44.9119	11.1109	1.5	2.2
036022P913CPTU948	44.8843	11.1008	1.5	1.5
036022P914CPTU949	44.8938	11.1138	1.5	5.8
036022P915CPTU950	44.8947	11.114	1.5	4.6
036022P916CPTU951	44.9003	11.1636	1.5	2.2
036022P917CPTU952	44.8901	11.0668	1.5	6.6
036022P918CPTU953	44.8931	11.0671	1.5	4.1
036022P919CPTU954	44.9247	11.183	1.5	16.3
036022P920CPTU955	44.9118	11.0963	1.5	3.9
036022P921CPTU956	44.9106	11.0988	1.5	3.4
036022P922CPTU957	44.9099	11.2356	1.5	3.8
036022P923CPTU958	44.8495	11.038	1.7	1.6
036022P924CPTU959	44.9295	11.2144	1.5	6.2
036022P925CPTU960	44.8746	11.129	1.5	3.2
036022P926CPTU961	44.8767	11.1437	1.5	5.6
036022P927CPTU962	44.8706	11.1193	1.5	1
036022P928CPTU963	44.8725	11.1215	1.5	1.4
036022P929CPTU964	44.8971	11.0547	1.5	8.3

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

036022P930CPTU965	44.8757	11.0051	1.7	7.1
036022P931CPTU966	44.8829	11.1137	1.5	2.4
036022P932CPTU967	44.8825	11.1199	1.5	3.4
036022P934CPTU969	44.8748	11.1022	1.5	5.2
036022P935CPTU970	44.8963	11.0377	1.5	5.3
036022P936CPTU971	44.867	11.0274	1.7	12.3
036022P937CPTU972	44.8838	11.0566	1.5	3.5
036022P938CPTU973	44.8665	11.0584	1.7	12.2
036022P939CPTU974	44.9114	11.0871	1.5	10.9
036022P940CPTU975	44.8872	11.0431	1.7	2.5
036022P941CPTU976	44.8862	11.0746	1.5	1.4
036022P942CPTU977	44.8975	11.0661	1.5	5.4
036022P943CPTU978	44.9342	11.2397	1.5	9.4
036022P944CPTU979	44.9339	11.244	1.5	5.3
036022P945CPTU980	44.9302	11.2043	1.5	10.4
036022P946CPTU981	44.9269	11.2539	1.5	1.4
036022P947CPTU982	44.9276	11.2558	1.5	1.4
036022P948CPTU983	44.8926	11.073	1.5	2.1
036022P949CPTU984	44.9	11.0629	1.5	3.4
036022P950CPTU985	44.8922	11.0836	1.5	7.2
036022P951CPTU986	44.8915	11.0927	1.5	2.2
036022P952CPTU987	44.9145	11.1438	1.5	12.6
036022P953CPTU988	44.8872	11.0636	1.5	3.5
036022P954CPTU989	44.9148	11.1439	1.5	1.9
036022P955CPTU990	44.8873	11.0641	1.5	3.5
036022P956CPTU991	44.9149	11.1436	1.5	3.1

Tabella 7-5 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTU (in grassetto sono evidenziate le righe relative alle indagini realizzate a supporto del presente studio di microzonazione). In tabella è riportato anche il valore di dell'accelerazione attesa in superficie ed utilizzata per il calcolo di I_L su ciascuna verticale.

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. Al contempo, le nuove indagini geognostiche realizzate, gli attuali standard di rappresentazione ed archiviazione informatica nazionali e la recente direttiva regionale adottata in materia di microzonazione sismica (D.G.R. 1227/2015), hanno reso necessaria una sostanziale revisione e l'aggiornamento degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica.

Per queste ragioni allo studio sono stati allegati anche gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole grafiche prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1). Tutti gli elaborati sono stati realizzati in scala 1:10.000; la base cartografica utilizzata è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 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) - $FA_{0,1-0,5s}$	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{0,5-1s}$	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{0,5-1,5s}$	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 (1101) che quelle realizzate per l'attuale approfondimento di terzo livello (14).

Nella cartografia a scala 1:10.000, le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica – versione 4.0b – della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 nel 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 il moto sismico in superficie o determinare eventuali effetti locali, la 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. Nello specifico l'unica perforazione che intercetta il substrato è rappresentata dal sondaggio realizzato nei pressi del campo sportivo di Via Napoli, nella zona meridionale del capoluogo comunale (codice 036022P829S847) e la cui stratigrafia è dettagliata in Figura 3-6.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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

Allo studio sono, infine, allegate due sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo, realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Martelli e Molinari, 2008; Allegato 1). Esse mostrano in dettaglio l'assetto stratigrafico delle principali unità litologiche riconosciute nel sottosuolo comunale. I rapporti geometrici e l'andamento dei corpi sedimentari sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave idrogeologica, in termini di acquiferi e acquicludo, sia in chiave più strettamente stratigrafica (Allegato 1).

8.2.2 Terreni di copertura

Nella parte affiorante delle unità di copertura, considerando le litologie più significative presenti nei primi 5-6 metri al di sotto del piano campagna, si sono distinte due unità, ciascuna associata ad una classe prevista dagli standard di microzonazione. Queste classi 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 due unità costituite da:

- **sedimenti sabbiosi di argine e canale fluviale (SMes):** L'unità è formata da sabbie medie e fini, a granulometria poco assortita che registrano il riempimento di canali fluviali di origine prevalentemente appenninica, ad andamento planimetrico curvilineo poco pronunciato. All'interno di questi corpi, sono presenti subordinati depositi più fini, limosi e sabbioso-limosi.
- **sedimenti fini di piana inondabile (Olpi):** L'unità è formata da argille limose e limi organici, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

dolce. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale. Quando i sedimenti di questa unità fiancheggiano direttamente corpi di paleolaveo del territorio comunale, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi.

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). Come definito nel paragrafo 6.1, al fine di ottenere una carta quanto più possibile indicativa delle variazioni in frequenza e ampiezza presenti nel territorio comunale di Mirandola, sono riportate in Tavola 3 solo le 118 misure ritenute maggiormente affidabili e confrontabili, su un totale di 226 presenti in banca dati.

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 uguali o superiori a 2.7 sono restituite con colori arancio e rosso, mentre il verde è utilizzato per valori inferiori a 2.2.

A scala comunale è ben riconoscibile un andamento nella variazione dei valori di frequenza (f_0) e ampiezza (A_0) del picco fondamentale. Come dettagliato nel capitolo 6, considerando le aree oggetto del presente studio di microzonazione, si possono distinguere: (i) una zona di alto stratigrafico in cui è evidente l'effetto dell'anticlinale sui depositi superficiali e il bedrock sismico (zona sud di Mirandola e frazioni di San Giacomo Roncole e Crocchio Zeni) caratterizzata da valori di frequenza relativamente più elevati (intorno a 1 Hz o superiori e ampiezza uguale o superiore a 2.7) ; (ii) una zona di basso stratigrafico (zona centro-nord di Mirandola e altre frazioni) in cui le frequenze sono mediamente più basse e soprattutto le ampiezze risultano molto inferiori. Questa suddivisione è quella che ha permesso di distinguere le due aree a diversa risposta sismica dettagliate al paragrafo 7.1.1 e conseguentemente di suddividere le carte di microzonazione sismica di terzo livello (Tavole da 6 a 9) in aree con distinti fattori di amplificazione.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

l'elaborato cartografico agli standard di rappresentazione e archiviazione informatica della Commissione Tecnica Nazionale, sia a fronte della disponibilità di molte nuove indagini realizzate per la ricostruzione post-sismica e a supporto degli approfondimenti di terzo livello di microzonazione (capitolo 0).

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 del rumore ambientale (v. tavola 3, paragrafo 8.3), 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 6 zone cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione (ZALQ)** e rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. È inoltre stata identificata una microzona **suscettibili di sola amplificazione locale** a cui è stato attribuito il codice 2007.

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 zonal.

Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

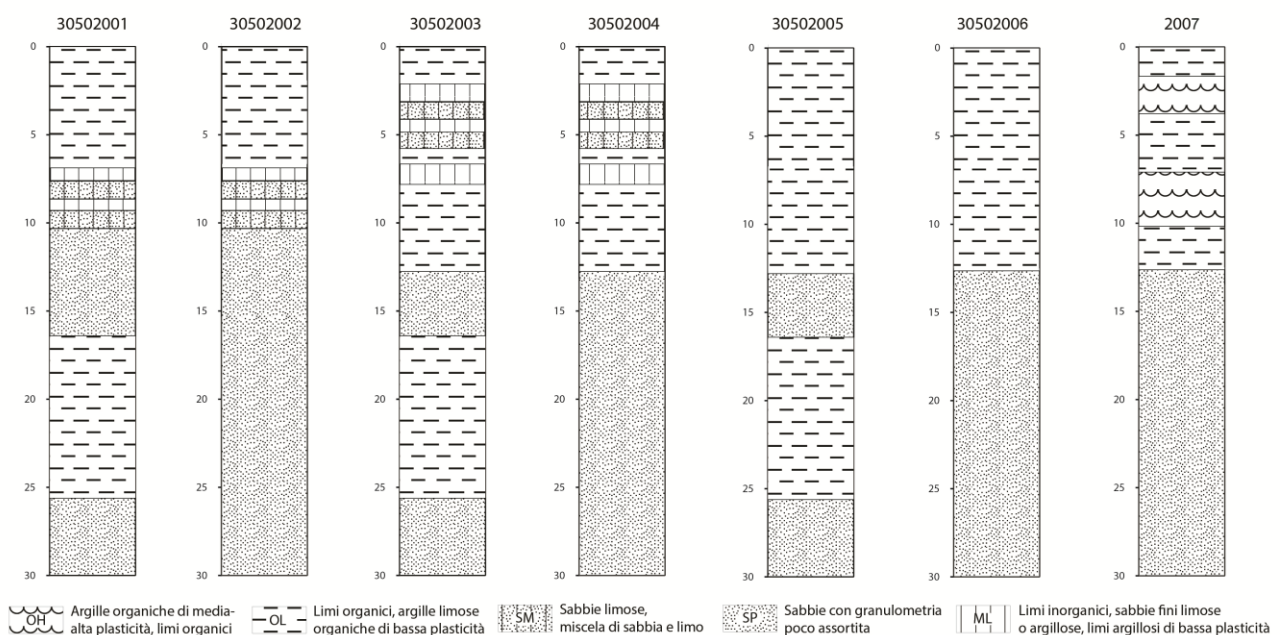


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Zona 30502001

Argille e argille limose mediamente consistenti di spessore inferiore a 10 m, con intercalazioni di limi argillosi. Seguono sabbie, inizialmente anche limose, ad addensamento e granulometria crescente con la profondità. A profondità comprese tra 15 e 28 m si rinviene uno spessore variabile di argille e argille limose consistenti.

Zona 30502002

Argille e argille limose mediamente consistenti di spessore inferiore a 10 m, con intercalazioni di limi argillosi. Seguono alternanze di sabbie limose e limi sabbiosi ad addensamento medio, che passano in breve a sabbie ad addensamento e granulometria crescente con la profondità, le quali si estendono fino alla fine della successione.

Zona 30502003

Argille e argille limose mediamente consistenti, intervallate già nei primi metri di profondità da limi sabbiosi e sabbie limose poco o mediamente addensate. Seguono limi e sabbie ad addensamento e granulometria crescente con la profondità. A profondità comprese tra 15 e 28 m si rinviene uno spessore variabile di argille e argille limose consistenti.

Zona 30502004

Argille e argille limose mediamente consistenti, intervallate già nei primi metri di profondità da limi sabbiosi e sabbie limose poco o mediamente addensate. Seguono, generalmente oltre i 10 m di profondità, sabbie ad addensamento e granulometria crescente con la profondità, le quali si estendono fino alla fine della successione.

Zona 30502005

Argille e argille limose mediamente consistenti di spessore superiore a 10 m, con intercalazioni di limi e limi argillosi. Seguono sabbie, inizialmente anche limose, ad addensamento e granulometria crescente con la profondità. A profondità comprese tra 15 e 28 m si rinviene uno spessore variabile di argille e argille limose consistenti.

Zona 30502006

Argille e argille limose mediamente consistenti di spessore superiore a 10 m, con intercalazioni di limi e limi argillosi. Seguono sabbie ad addensamento e granulometria crescente con la profondità, con rare intercalazioni limose, le quali si estendono fino alla fine della successione.

Zona 2007

Argille e argille limose mediamente consistenti di spessore superiore a 10 m, con rare intercalazioni di limi argillosi. Seguono sabbie ad addensamento e granulometria crescente con la profondità, con rare intercalazioni limose, le quali si estendono fino alla fine della successione.

Rispetto alle sette diverse zone sopra definite, si evidenziano di seguito alcune particolarità che le accomunano o le differenziano e che aiutano a spiegare i criteri utilizzati per la loro individuazione.

Le sei zone instabili presentano a due a due la medesima stratigrafia all'interno dei primi 15 metri (30502001 e 30502002, 30502003 e 30502004, 30502005 e 30502006), ma si differenziano nella porzione

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

sottostante: le zone con codice pari (30502002, 30502004 e 30502006) presentano, con rare eccezioni di spessore limitato, una successione continua di sabbie di Po, mentre in quelle con codice dispari (30502001, 30502003, 30502005), concentrate nella porzione sud-occidentale del territorio comunale, le stesse sabbie sono intervallate da depositi limo-argillosi di spessore in genere di alcuni metri (come dettagliato al paragrafo 5.2.2).

Le zone 30502006 e 2007, risultano entrambe prive di depositi granulari entro i primi 10 metri di profondità e di fatto caratterizzate da stratigrafie molto simili e spesso difficilmente distinguibili dalle sole indagini geognostiche, se non per il fatto che l'indice di liquefazione calcolato a seguito degli approfondimenti di terzo livello risulta superiore a 2 nella zona 30502006, per questa ragione definita come instabile.

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 60 punti di misura di V_s 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 sia diretto che indiretto (Tabella 8-2). Le differenti tipologie di indagini sono rappresentate in cartografia mediante simboli grafici distinti, rispondenti ai già citati standard di rappresentazione utilizzati per lo studio. Si precisa che come per la carta delle frequenze (paragrafo 8.2) anche per la carta delle velocità delle onde di taglio sono state utilizzate solamente le indagini ritenute maggiormente affidabili, scartandone diverse ritenute per varie ragioni di dubbia validità.

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPT	28	MASW	15
DH	2	ESAC-SPAC	13
CH	2		

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

La distribuzione e l'andamento dei valori di V_{s30} , non di rado inferiori a 200 m/s, risultano 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 e 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 e Tabella 8-4) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale. Le analisi sono state eseguite tenendo conto sia delle diversità delle microzone individuate e sia soprattutto dell'assetto tettonico del territorio, che, come dettagliato nel paragrafo 7.1.1, può essere schematicamente suddiviso in due macro aree strutturalmente omogenee.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,7	1,8	2,1	2,2

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della zona di "alto" stratigrafico (anticlinale) che interessa la porzione meridionale del capoluogo comunale e le frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni (RSL1)

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,5	1,5	2,5	2,5

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 MIRANDOLA

Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della per la zona di “basso” stratigrafico che interessa la porzione centro-settentrionale del capoluogo comunale e le restanti frazioni (RSL2).

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

Le “Zone di suscettibilità per liquefazione” sono state derivate dalle “Zone di attenzione per liquefazione” della carta MOPS (tavola 4, paragrafo 8.4) utilizzando tematizzazioni e indicazioni diverse rispetto a queste ultime, in accordo con gli standard di MS 4.0b (2015).

Le “Zone di suscettibilità per liquefazione” sono state inoltre definite e arealmente suddivise per classi di rischio, sulla base dell’indice del potenziale di liquefazione (I_L). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l’utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$), elevato ($5 < I_L \leq 15$) e molto alto ($I_L > 15$). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione nazionale prevedono che le aree che risultano a basso rischio ($2 < I_L$) siano considerate stabili, nonostante siano state verificate le condizioni predisponenti il fenomeno (presenza di depositi granulari saturi entro i primi 20 metri di profondità). Questo aspetto determina necessariamente la corrispondenza tra le “Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali” delle carte di microzonazione sismica di terzo livello con quelle della carta MOPS.

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, anche se di questi ultimi si è tenuto opportunamente conto in fase di redazione delle cartografie, in particolare là dove risultano meno presenti gli indici ricavati da prove CPTE/CPTU. 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 ($2 < I_L \leq 5$), i rossi elevato ($5 < I_L \leq 15$) e quelli viola rischio molto elevato ($I_L > 15$).

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, 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.

Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, inoltre, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di considerare il recente metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, come maggiormente affidabile per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

Nel paragrafo seguente viene proposta una sintesi riassuntiva dei principali risultati dello studio condotto e delle principali criticità rilevate, anche attraverso il confronto tra quanto prodotto nei precedenti elaborati di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza 70/2012 e Tarabusi, 2012).

9.1 Sintesi dei risultati della microzonazione sismica

Gli approfondimenti realizzati nel primo studio di microzonazione sismica (Tarabusi, 2012) avevano già permesso l'individuazione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore a stazione singola. Tali misure, correlate con i dati stratigrafici disponibili (Allegato 1; Martelli e Molinari, 2008), avevano permesso di individuare il substrato sismico in corrispondenza del tetto dei depositi del Pliocene. Tali determinazioni sono state in seguito confermate dai sondaggi appositamente realizzati dalla Regione Emilia-Romagna in seguito agli eventi del 2012, che hanno permesso la misura diretta delle velocità delle onde di taglio (V_s), acquisite in foro sino ad elevate profondità.

Tale superficie si trova sepolta a profondità assai variabili, inferiori a 100 metri nella fascia meridionale del territorio comunale e pari a circa 400-500 metri in quelle centrali e settentrionali. Tale variabilità è stata determinata dalla deformazione tettonica che dal Pliocene ha profondamente condizionato l'evoluzione di questo settore della Pianura Padana.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Sulla base delle nuove conoscenze acquisite mediante gli approfondimenti di terzo livello, **il territorio di Mirandola è stato suddiviso in due distinte aree a diversa pericolosità sismica**, in base ai differenti valori dei fattori di amplificazione ottenuti dalle analisi di risposta sismica. Tali aree riflettono l'influenza dell'anticlinale di Mirandola, attualmente in fase di sollevamento attiva e all'origine del terremoto del 29 maggio 2012 e della sequenza sismica ad esso associata, sull'assetto stratigrafico del sottosuolo. In particolare sono state distinte:

a) la **parte meridionale del territorio** comunale, caratterizzata, almeno per quanto riguarda le aree oggetto dello studio di microzonazione di terzo livello, dalla presenza dell'alto strutturale di Mirandola. La presenza della struttura tettonica ha determinato il sollevamento delle unità plioceniche, corrispondenti al substrato sismico, sino a profondità inferiori a 150 metri. In particolare, in corrispondenza della culminazione dell'anticlinale, all'altezza della frazione di San Giacomo Roncole, dove si registra il massimo sollevamento, il bedrock si rinviene ad una profondità stimata attorno agli 80 metri.

Quest'area, in cui si sviluppa la porzione più meridionale del capoluogo e in cui sono presenti le frazioni di San Giacomo Roncole e Crocicchio Zeni, presenta terreni di copertura ovviamente meno spessi e risulta caratterizzata da più alti valori dei fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,25 g**.

b) la **porzione centro-settentrionale** del territorio comunale, sviluppata a nord dell'anticlinale di Mirandola. In questa ampia area la successione di coperture sedimentarie risulta più spessa, al di sopra di un bedrock sismico a profondità variabili tra i 350 e i 500 metri. Questa porzione di territorio, in cui si sviluppano la porzione centro-settentrionale del capoluogo e gli ambiti urbani delle frazioni di Quarantoli, Gavello, San Martino Spino, Tramuschio, Mortizzuolo e Ponte San Pellegrino è caratterizzata da valori minori dei fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,21 g**.

Una simile ripartizione del territorio comunale era già stata proposta negli studi di microzonazione sismica realizzati dalla Regione Emilia-Romagna in seguito agli eventi del 2012 (Martelli e Romani, 2013) e riflette sostanzialmente quanto determinato ancor prima nella microzonazione di secondo livello, ultimata nel febbraio 2012 (Tarabusi, 2012).

Rispetto agli studi precedenti (cfr. Ordinanza 70/2012), l'estensione delle diverse fasce è stata modificata restringendo quella meridionale, caratterizzata da substrato sismico relativamente poco profondo, alla sola area di culminazione della anticlinale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Allo stesso modo sono stati rivisti i fattori di amplificazione, in questa fase determinati con analisi di risposta sismica locale, ma è da notare come i valori di **accelerazione** di picco (PGA) risultano analoghi a quelli proposti nel suddetto studio.

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 stati calcolati utilizzando il metodo semplificato di Boulanger e Idriss (2014) in ogni sito caratterizzato mediante indagine CPTU.

La distribuzione degli indici di liquefazione evidenzia come le **fasce a maggior rischio** siano spesso collocate in **corrispondenza dei paleovalvei o dei corpi da rotta fluviale** sub-affioranti. Queste fasce, formate da sabbie e limi poco addensati di riempimento di canale e argine prossimale (MOPS 30502003 e 30502004), mostrano in generale i potenziali di liquefazione più elevati.

Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli ($I_L < 2$) caratterizzano invece una ridotta porzione del territorio oggetto di studio. Si tratta di alcune delle **aree topograficamente più depresse del territorio comunale**, che non presentano significativi corpi di sabbie nei primi 15 m di sottosuolo, in quanto essenzialmente formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, depositi in condizione di depressione interalvea (MOPS 2007).

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative al grado di rischio liquefazione delle diverse aree 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.

Non è purtroppo possibile verificare una correlazione tra quanto determinato con lo studio di microzonazione e quanto riscontrato nel 2012 dal momento che gli effetti di liquefazione osservati in superficie e quindi mappati (Figura 2-6) sono tutti localizzati in aree rurali non oggetto della microzonazione sismica di terzo livello. In ogni caso, rispetto a quanto osservato nel 2012 a Mirandola, e più in generale nell'area epicentrale (paragrafo 2.1.1), è bene ricordare che la mancanza di evidenze superficiali quali la fuoriuscita di sabbia dal terreno, non esclude che il fenomeno della liquefazione possa essersi comunque verificato a carico dei depositi sabbiosi saturi presenti in profondità, dando luogo, in ogni caso, a cedimenti del terreno più o meno evidenti in superficie. Diverse lesioni riscontrate a carico di edifici a seguito delle scosse principali della sequenza del 2012 potrebbero quindi essere state determinate proprio da effetti di liquefazione in profondità che non hanno dato luogo a manifestazioni superficiali evidenti.

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.
- Albarello 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., Colalongo M. L., Pasini G., Preti D. (1999): *Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy)*. *Sedimentology*, 46, 99-121.
- 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.
- 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>.
- Boulanger 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

- 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 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- 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. e Bianconi L. (2005) - *Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique*. Geologia e tecnica ambientale, 3.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. 2188/2016: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 344/2016. *Approvazione dei criteri, delle linee guida e delle indicazioni tecniche e procedurali per la presentazione dei progetti e l'attribuzione dei 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*.
- 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>.
- DISS Working Group, (2018): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

- 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>.
- 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., (2018): *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (2016): *Italian Seismological Instrumental and parametric database versione 1.0*. DOI: 10.13127/ISIDe.
- 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., Madiati 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., Molinari F.C. (a cura di) (2008): *Studio geologico finalizzato alla ricerca di potenziali serbatoi geotermici nel sottosuolo del comune di Mirandola*, Regione Emilia Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Bologna.
- 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.
- 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.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

- 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.
- 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*.
- Regione Emilia Romagna - Ufficio Geologico (1999) - Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.
- 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): *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, 2, 4, pp. 550-555.

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.

Tarabusi G. (2012): *Microzonazione sismica del comune di Mirandola*. Quadro conoscitivo del PSC di Mirandola, <http://psc.unioneareanord.mo.it/mirandola/PSC.htm>.

Tarabusi G. (2015): *Caratterizzazione Geologica delle nuove aree di espansione*. Quadro conoscitivo del PSC di Mirandola, http://psc.unioneareanord.mo.it/mirandola/Emissione_corrente/QC/QC_B.REL3.pdf

Tarabusi G., Caputo R. (2017): *The use of HVSR measurements for investigating buried tectonic structures: the Mirandola anticline, Northern Italy, as a case study* - International Journal of Earth Sciences 106(1). doi: <http://doi.org/10.1007/s00531-016-1322-3>.

Vittori E., Ventura G. (1995): *Grain size of fluvial deposits and late Quaternary climate: A case study in the Po River valley (Italy)*. Geology, 23(8), 735-738.

Zoetemeijer R. (1993): *Tectonic Modelling of Foreland Basins, thin skinned thrusting, syntectonic sedimentation and lithospheric flexure*. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 - 0,5 s}	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - FA _{0,5 - 1,0 s}	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - FA _{0,5 - 1,5 s}	1:10.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS
