PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

RegioneEmilia-Romagna

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

# Relazione illustrativa

## Regione Emilia-Romagna

## Comune di Bellaria Igea Marina



| Regione | Soggetto realizzatore | Data |
|---|---|---|
|  | Responsabile:<br>Dott.Geol. Alessandro Merli<br><br>Gruppo di lavoro:<br><br>Dott.Geol. Paolo Ciacci<br>Dott.Geol. Carlo Copioli<br>Dott.Arch. Silvia Malpassi<br>Dott.Geol. Fabio Vannoni | Aprile 2025 |

**INDICE**

1. PREMESSA ..... 3
2. INTRODUZIONE ..... 4
3. SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE ..... 7
4. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA ..... 21
4.1. Cartografia di base ..... 21
4.2. Inquadramento Geomorfologico ..... 21
4.3. Inquadramento Geologico-Strutturale ..... 24
4.4. Assetto Stratigrafico ..... 26
5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI ..... 44
5.1. Indagini di tipo geofisico ..... 45
5.2. Indagini di tipo geotecnico ..... 47
6. MODELLO DI SOTTOSUOLO ..... 47
6.1. *Andamento delle Vs nel sottosuolo* ..... 47
7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE ..... 51
8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI ..... 51
9. ELABORATI CARTOGRAFICI ..... 52
9.1 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I ..... 52
9.1.1 Carta geologico-tecnica ..... 52
9.1.2 Carta delle frequenze naturali del terreno ..... 54
9.1.3 Carta delle MOPS (Microzone Omogene in prospettiva Sismica) ..... 57
9.2 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO II ..... 63
9.2.1. carta delle velocità delle onde di taglio Vs ..... 63
9.2.2. Carta dei fattori di amplificazione stratigrafica (FA) ..... 64
9.2.3 Fattori di amplificazione Topografica (FT) ..... 68
9.2.4 Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto "$H_{SM}$" ..... 68
10. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (ANALISI DI RSL E LIQUEFAZIONE) ..... 70
10.1 Analisi di Risposta Sismica Locale ..... 71
10.1.1 Modellazione numerica e codici di calcolo ..... 71
10.1.2 Moto di input ..... 71
10.1.3 Modello di sottosuolo e parametri dinamici ..... 73
10.1.4 Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione ..... 77
10.2 Stabilità di Sito – Potenziale di liquefazione ..... 87
10.2.1 Generalità e valutazioni geologico-tecniche ..... 87
11. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI ..... 95
12 CONCLUSIONI ..... 99
13. BIBLIOGRAFIA ..... 102

ALLEGATI:

- ALLEGATO 1: Prove geognostiche/geofisiche di nuova realizzazione
- ALLEGATO 2: Sezioni geolitologiche
- ALLEGATO 3: Parametri di scuotimento sismico – accelerogrammi di output
- ALLEGATO 4: Dati spettro medio di output
- ALLEGATO 5: Verifiche di liquefazione
- ALLEGATO 6: Tabelle parametriche di sintesi verifiche di liquefazione

## 1. PREMESSA

La microzonazione sismica, cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base alla differente risposta rispetto ad un ipotetico terremoto, è uno degli strumenti più efficaci per la riduzione del rischio sismico in quanto permette, fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica, di valutare la pericolosità sismica nelle aree urbane e urbanizzabili, indirizzare i nuovi interventi verso quelle zone a minore pericolosità e programmare interventi di mitigazione del rischio nelle zone in cui sono presenti particolari criticità.
La L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e uso del territorio" e la L.R. 19/2008 "Norme per la riduzione del rischio sismico", richiedono l'esecuzione di studi di microzonazione sismica per la redazione e l'approvazione dei piani urbanistici comunali.
In data 02/05/07 la Regione Emilia-Romagna con deliberazione dell'Assemblea Legislativa n.112/2007 ha approvato gli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Successivamente tali indirizzi sono stati aggiornati con l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico approvato con Del. G.R. 2193/2015 ed in ultimo la più recente Del. G.R. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)". Infine con *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, la R.E.R. ha pubblicato il recente "AGGIORNAMENTO DELL'"ATTO DI COORDINAMENTO TECNICO SUGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)" DI CUI ALLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630" cui poter far riferimento per la redazione di studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.
Anche il Dipartimento della Protezione Civile e la Conferenza delle Regioni e Province Autonome in data 13 novembre 2008 ha approvato gli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", e con OCDPC n. 978/2023 e D.G.R. 1936/2023, sono stati definiti i criteri e le risorse finanziarie per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

Il comune di Bellaria - Igea Marina, pertanto, essendo in possesso dei requisiti necessari, ha ottenuto il relativo finanziamento e gli studi che sono stati previsti per le aree urbanizzate e urbanizzabili del comune destinatario del contributo sono relativi per studi di Microzonazione Sismica (da qui in avanti MS); allo scopo, tali studi ed analisi sono stati eseguiti secondo le indicazioni/prescrizioni di cui alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021* ovvero in ottemperanza agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica dei dati di MS e CLE, rispettivamente 4.2 del 2020 e 3.2 del 2019.

## 2. INTRODUZIONE

A seguito di un terremoto, si ha spesso modo di osservare come la distribuzione dei danni sul territorio sia assai eterogenea a parità di vulnerabilità dell'edificato. Le condizioni geologico-tecniche degli strati più superficiali, nonché le caratteristiche geomorfologiche possono concorrere, infatti, a modificare localmente lo scuotimento indotto da un terremoto. Per un'efficace azione di prevenzione, in materia di rischio sismico, è necessario tener conto non solo, quindi, della zonazione sismica nazionale, ma anche di eventuali sfavorevoli condizioni locali, a scala comunale o sub comunale. Particolarmente rilevanti sono i cosiddetti effetti di amplificazione di sito, ossia l'insieme delle variazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, rispetto ad una formazione rocciosa di base, subisce attraversando gli strati sovrastanti, fino alla superficie. Tali effetti sono causati, essenzialmente, da un processo di intrappolamento e risonanza dell'energia del terremoto all'interno di un volume di sottosuolo costituito da materiali sedimentari a bassa impedenza sismica (IS: prodotto della velocità di propagazione dell'onda per la densità del mezzo attraversato) e posto sopra ad un dominio con più alta IS, per esempio un substrato roccioso o un suolo particolarmente rigido. L'identificazione delle aree soggette ad amplificazione sismica è dunque di fondamentale importanza per la pianificazione e lo sviluppo urbanistico comunale. Uno studio di questo genere prende il nome di Microzonazione Sismica ed ha lo scopo di individuare porzioni del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo.

La messa a punto di una procedura condivisa per lo studio di questi fenomeni è stata recentemente oggetto di un intenso lavoro di coordinamento e sintesi delle conoscenze finora disponibili da parte della Conferenza delle Regioni che, con il coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile, ha messo all'opera una grande quantità di tecnici ed esperti per la messa a punto, nel 2008, degli **"Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica"** (figura 2.1)**.**

Le prime esperienze regionali sulla microzonazione dopo vari eventi sismici e alcune normative regionali su tale ambito hanno rappresentato le condizioni preliminari per creare delle basi comuni e condivise, recependo quanto è stato elaborato e sperimentato a livello scientifico e sviluppando le istanze espresse in vario modo dalle Regioni e dalle amministrazioni.

Il gruppo di lavoro, coadiuvato anche dalle osservazioni da parte di soggetti esterni (Consiglio nazionale dei Geologi, Consiglio nazionale degli Ingegneri, Associazione Geotecnica Italiana, ecc..), nel corso della sua attività ha evidenziato che la sperimentazione e l'applicazione degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" rientra a pieno titolo nei programmi nazionali di previsione e prevenzione previsti dall'articolo 4 della legge n°225 del 24 Febbraio 1992.

Questo testo, che rappresenta un punto di riferimento per tutte le attività di microzonazione sismica ad opera degli Enti territoriali, definisce una serie di protocolli e tecniche di indagine del sottosuolo applicabile ai

settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione.




*Figura 2.1- Copertina dell'elaborato"Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica"*

In funzione dei diversi contesti, dei diversi obiettivi e delle disponibilità economiche le linee guida (Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica) prevedono 3 differenti livelli di approfondimento, con complessità, impegno e costi crescenti.

***Livello 1***: è un livello propedeutico ai veri e propri studi di microzonazione sismica, in quanto consiste nella messa a punto di un quadro conoscitivo generale in base a dati preesistenti ed indagini a basso costo realizzate ex-novo. L'obiettivo è l'individuazione in pianta di una serie di settori definiti "microzone" all'interno dei quali è possibile ipotizzare un comportamento sismico dei terreni omogeneo.

***Livello 2***: introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee definite nel livello 1. A ciascuna microzona viene associato un fattore di amplificazione (FA) computato attraverso appositi abachi realizzati "ad hoc" per tutto il territorio regionale in base alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e sismiche.

***Livello 3***: restituisce una carta di microzonazione sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari (p.es. fenomenologie legate a cedimenti e liquefazione).

Nel presente rapporto tecnico-scientifico vengono illustrati gli elaborati e i prodotti informatici relativi alle indagini e agli studi svolti nell'ambito della Microzonazione Sismica di I-II Livello e con approfondimenti di III livello di analisi, delle aree urbanizzate e urbanizzabili presenti nel territorio comunale di Bellaria – Igea Marina (RN), (figura 2.2). In Tabella 2.1 è riportata una sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici redatti per il presente studio:

*Tabella 2.1 – sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici in allegato alla relazione*

| Titolo Elaborato | Scala | N° tavole |
|---|---|---|
| Carta delle Indagini | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carte delle Frequenze naturali dei Terreni (F0) | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carta Geologico Tecnica | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carta delle MOPS | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carta delle Velocità delle onde di taglio S | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carta isopotenziali di liquefazione | Scala 1:8.000 | 1 |
| Carte di Microzonazione sismica di II e III Livello | Scala 1:8.000 | 12 |




*Aree abitate ISTAT oggetto di studio*

*Figura 2.2- Centri abitati ISTAT nell'ambito del territorio urbanizzato/urbanizzabile del comune di Bellaria – Igea Marina.*

## 3. SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE

Il territorio in studio del comune di Bellaria – Igea Marina interessa il margine settentrionale della Provincia di Rimini e si estende su un'area complessiva di circa 18.17 km², contando 19.508 abitanti (Figura 3.1), contraddistinto dal Codice Istat: 099001.

Per la definizione della sismicità storica del territorio in studio è stato consultato il Database Macrosismico Italiano DBMI15 (*Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3*). La successiva Tabella 3.1 riporta i principali eventi sismici (scosse principali "mainshock") risentiti nel comune in esame. Per ogni evento sismico sono riportate: data, area epicentrale, intensità epicentrale $I_0$ (valori in scala MCS), magnitudo momento $M_W$ (stimata da correlazioni empiriche o misurata) e intensità al sito $I_S$ (MCS).




*Figura- 3.1: Evidenziato in rosso il territorio appartenente al comune di Bellaria – Igea Marina nel settore settentrionale della Provincia di Rimini, oggetto del presente studio di MS.*

*Tabella 3.1 – Storia sismica del Comune di **Bellaria- Igea Marina** (estratta dal DBMI15).*

| Effects | Reported earthquakes | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Int. | Year | Mo | Da | Ho | Mi | Se | Epicentral area | NMDP | Io | Mw |
| 6-7 | 1786 | 12 | 25 | 01 | | | Riminese | 90 | 8 | 5.66 |
| NF | 1986 | 12 | 06 | 17 | 07 | 1 | Ferrarese | 604 | 6 | 4.43 |
| NF | 1987 | 07 | 05 | 13 | 12 | 3 | Montefeltro | 90 | 6 | 4.44 |
| 3-4 | 1993 | 11 | 07 | 23 | 21 | 1 | Cesenate | 36 | 4-5 | 3.95 |
| 4 | 1993 | 11 | 09 | 13 | 46 | 2 | Cesenate | 28 | 4-5 | 3.93 |
| 4 | 1995 | 12 | 27 | 23 | 44 | 2 | Forlivese | 37 | 5 | 3.97 |
| 4-5 | 1997 | 09 | 26 | 00 | 33 | 1 | Appennino umbro-marchigiano | 760 | 7-8 | 5.66 |
| 4-5 | 1997 | 09 | 26 | 09 | 40 | 2 | Appennino umbro-marchigiano | 869 | 8-9 | 5.97 |
| 4 | 1998 | 03 | 26 | 16 | 26 | 1 | Appennino umbro-marchigiano | 409 | | 5.26 |
| 3 | 1999 | 01 | 25 | 22 | 45 | 5 | Appennino forlivese | 97 | 5 | 4.36 |
| 3 | 2000 | 05 | 06 | 22 | 07 | 0 | Faentino | 85 | 5 | 4.08 |
| 4 | 2000 | 05 | 08 | 12 | 29 | 5 | Faentino | 126 | 5 | 4.67 |
| 3-4 | 2000 | 05 | 10 | 16 | 52 | 1 | Faentino | 151 | 5-6 | 4.82 |
| 4-5 | 2000 | 08 | 01 | 02 | 34 | 3 | Montefeltro | 84 | 5-6 | 4.27 |
| NF | 2001 | 11 | 26 | 00 | 56 | 5 | Casentino | 211 | 5-6 | 4.63 |
| 3-4 | 2002 | 11 | 02 | 10 | 57 | 4 | Ferrarese | 79 | 4 | 4.21 |
| 3 | 2003 | 09 | 14 | 21 | 42 | 5 | Appennino bolognese | 133 | 6 | 5.24 |
| 4-5 | 2003 | 12 | 07 | 10 | 20 | 3 | Forlivese | 165 | 5 | 4.18 |
| NF | 2005 | 07 | 15 | 15 | 17 | 1 | Forlivese | 173 | 4-5 | 4.29 |
| 2 | 2006 | 10 | 21 | 07 | 04 | 1 | Anconetano | 287 | 5 | 4.21 |
| F | 2017 | 01 | 18 | 10 | 14 | 0 | Aquilano | 280 | | 5.70 |

*Estratto della tabella esplicativa riportante i parametri che costituiscono il formato sintetico del database:*

**Field Description**

**N** Record number (in chronological order)

**Year** Origin time: year

**Mo** Origin time: month

**Da** Origin time: day

**Ho** Origin time: hour

**Mi** Origin time: minutes

**Se** Origin time: seconds

**EpicentralArea** Epicentral area or area of the largest macrsoseismic effects

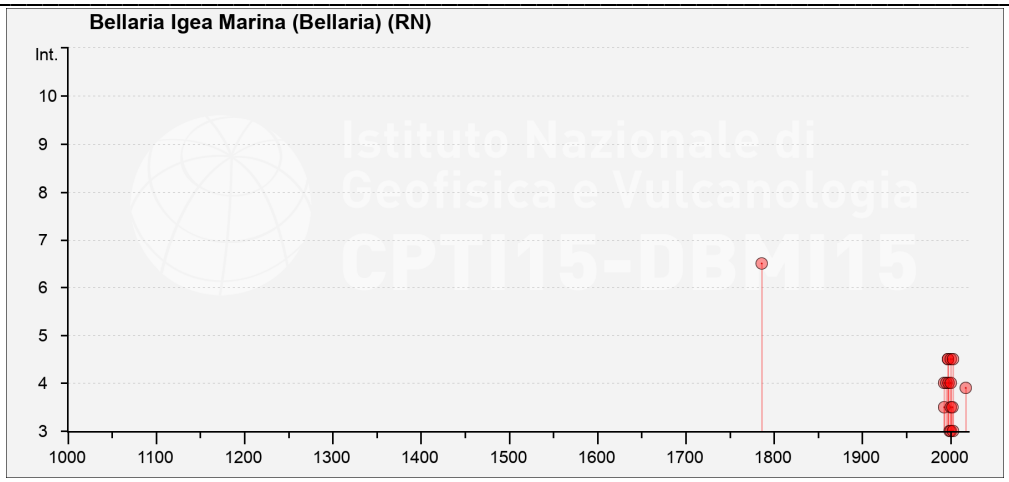
**Mw** moment magnitude

**NMDP** Number of macroseismic data point

**Imax** Maximum intensity

**Io** Epicentral intensity

*N.F (not felt-non avvertito)

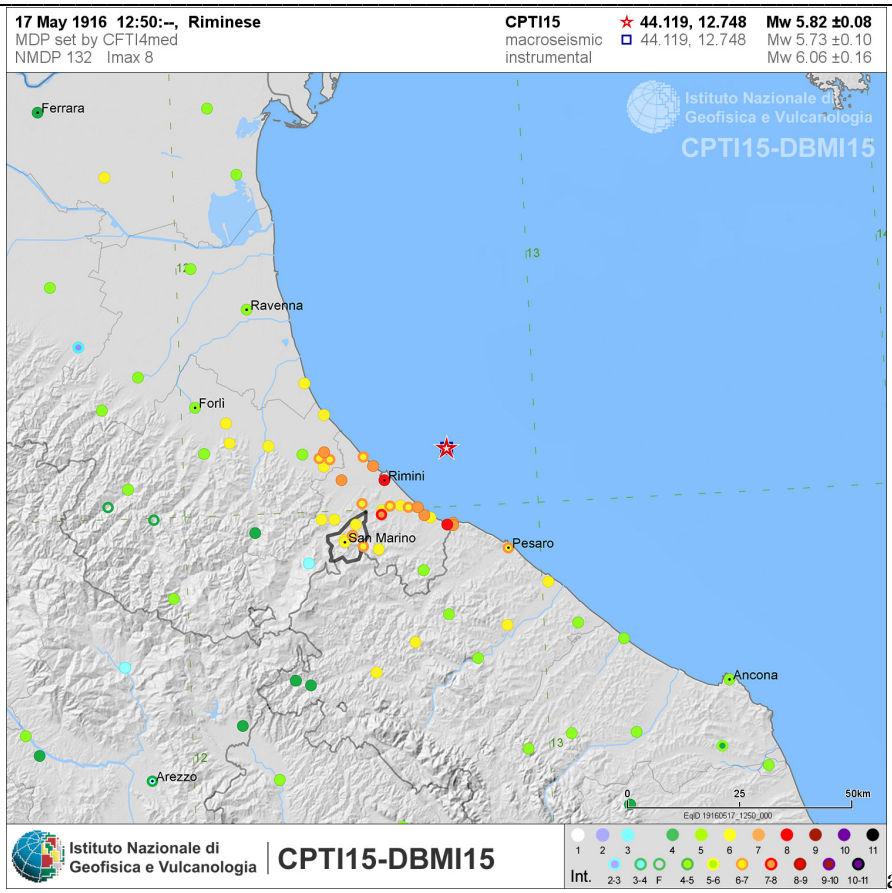



*Distribuzione temporale degli eventi sismici considerati*

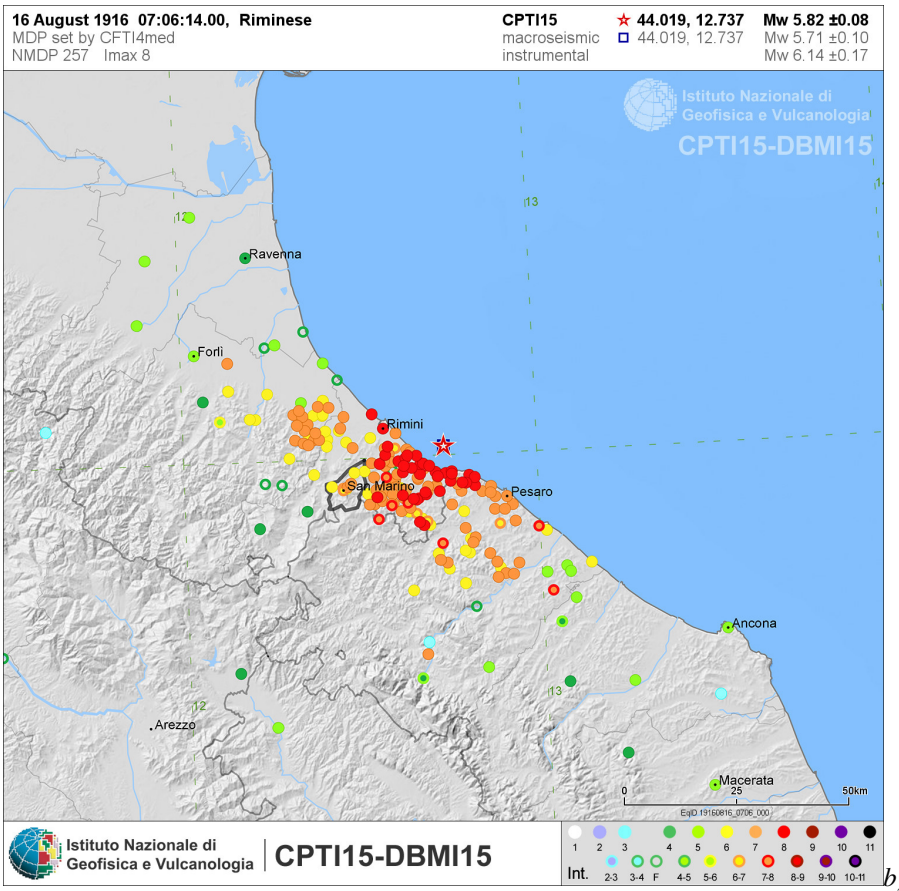
L'esame della storia sismica risulta parzialmente carente di informazioni storiche (verosimilmente a causa dello sviluppo recente dell'abitato) e, tuttavia, indica quali eventi di maggior rilevanza il solo terremoto dell' "Riminese" del 1786. Tuttavia la storia sismica degli abitati immediatamente limitrofi (tra cui Rimini) evidenzia ulteriori eventi degni di menzione per rilevanza quali: il terremoto "Riminese" del 1308, 1472, 1672, 1875 e del 1916. Tali sismi infatti hanno generato in prossimità delle zone epicentrali il massimo risentimento e danno (VII $\leq I_S \leq$ VIII MCS), dei quali l'ultimo evento, in termini temporali e particolarmente significativo, è stato quello del Riminese 1916, di cui in fig. 3.2 a) e b) viene riproposto lo stralcio della carta dei risentimenti macrosismici INGV rispettivamente per gli eventi principali del 17 maggio e 16 agosto 1916. Inoltre in fig. 3.3 si propongono le carte delle isosisme ricostruite da INGV per i maggiori terremoti storici della Romagna.

In base alla disposizione degli epicentri, nonché da una verifica sul database DISS 3.2 e 3.3 (Database of Individual Seismogenic Sources) realizzato dal'INGV, è possibile inoltre risalire alle aree sismogenetiche che hanno contribuito alla sismicità storica della zona in studio ed alla pericolosità sismica dell'area (vedi fig. 3.4); in tal caso si tratta di sistemi di faglia appenninici e costieri prevalentemente di natura compressiva.

Come riportato da "La sismicità della zona costiera adriatica nord-marchigiana di Stefano Mazzoli e Chiara Macchiavelli" si trae che studi effettuati in tempi recenti da gruppi di ricerca (Borraccini et alii, 2002, 2005; Di Bucci et alii, 2003; Santini et alii, 2011; Macchiavelli et alii, 2012), la sismicità della zona costiera, prossima alle Marche settentrionali, mostra un comportamento complesso, caratterizzato da una notevole variabilità delle orientazioni degli assi di massima e minima compressione (Fig. 3.5). Nonostante un notevole dibattito scientifico esista circa la cinematica delle faglie attive ed campo di stress attualmente dominante nell'area d'interesse (Frepoli & Amato, 1997, 2000; Montone et alii, 1999, 2004, 2012; Boncio et alii, 2000; Di Bucci & Mazzoli, 2002; Vannoli et alii, 2004; Chiarabba et alii, 2005; Pondrelli et alii, 2006; Basili et al., 2007; Boncio & Bracone, 2009; Piccinini et alii, 2009; Pierdominici et alii, 2012; Macchiavelli et alii, 2012), tutti gli Autori concordano sul fatto che le faglie attive principali che controllano la sismicità dell'area siano rappresentate da strutture con direzione circa parallela alla costa e immersione dominante verso sud-ovest (costituite, almeno originalmente, da faglie inverse).

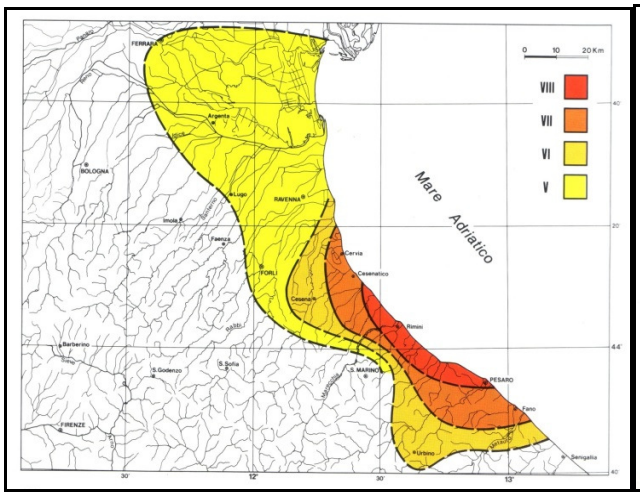



a)

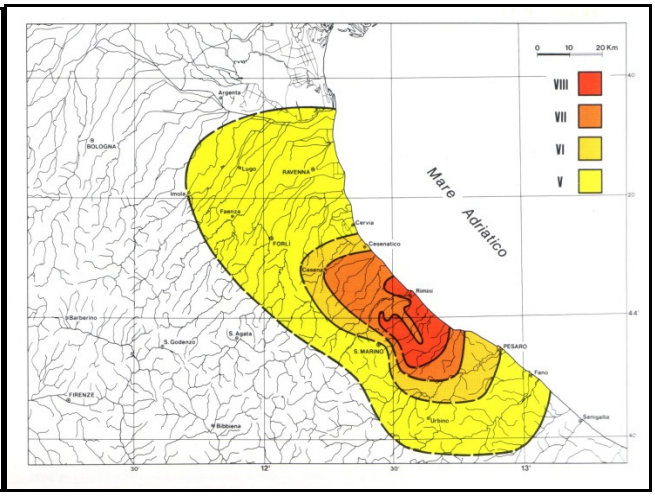



b)

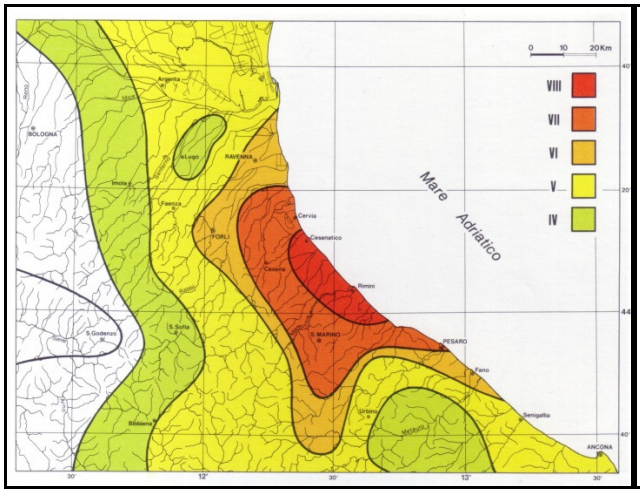
*Figura- 3.2: Carta del risentimento macrosismico – terremoto Riminese eventi maggio/agosto 1916 - DBMI15 (a e b)*



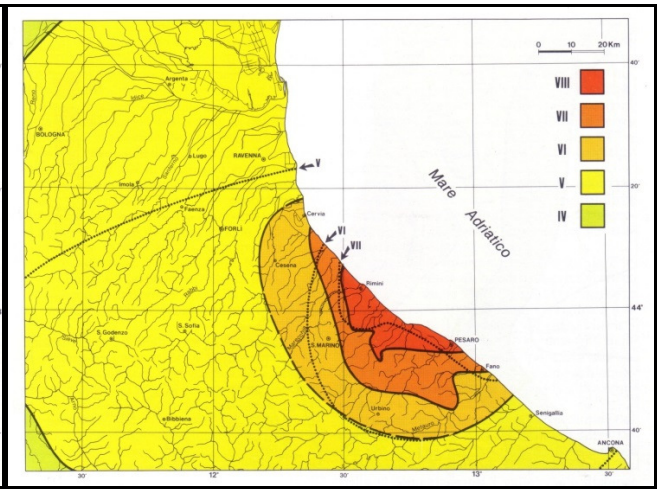

**Terremoto del 14 aprile 1672**




**Terremoto del 25 dicembre 1786**




**Terremoto del 17 marzo 1875**




**Terremoto del 17 maggio – 16 agosto 1916**

*Figura - 3.3: Carte delle isosisme in cui le aree colorate dal rosso al verde corrispondono a parti di territorio colpite da effetti di severità decrescente. (DISS3/INGV).*

Inoltre dai diagrammi di disaggregazione per magnitudo (M) e distanza (R) in Figura 3.6 ($T_r$ 475 anni), desunti dal Progetto DPC-INGV-S1 (2006) e Iervolino et Al. 2011, si osserva come i maggiori contributi alla pericolosità dell'area siano legati al sistema di faglie costiere adriatiche (onshore e offshore) ed appenniniche entro i 20 Km di distanza (valore medio R< 10 km). In maniera minore sembrano intervenire, quindi, i grandi sistemi appenninici conosciuti in letteratura come Etrurian Fault System (EFS) e Umbria Fault System.

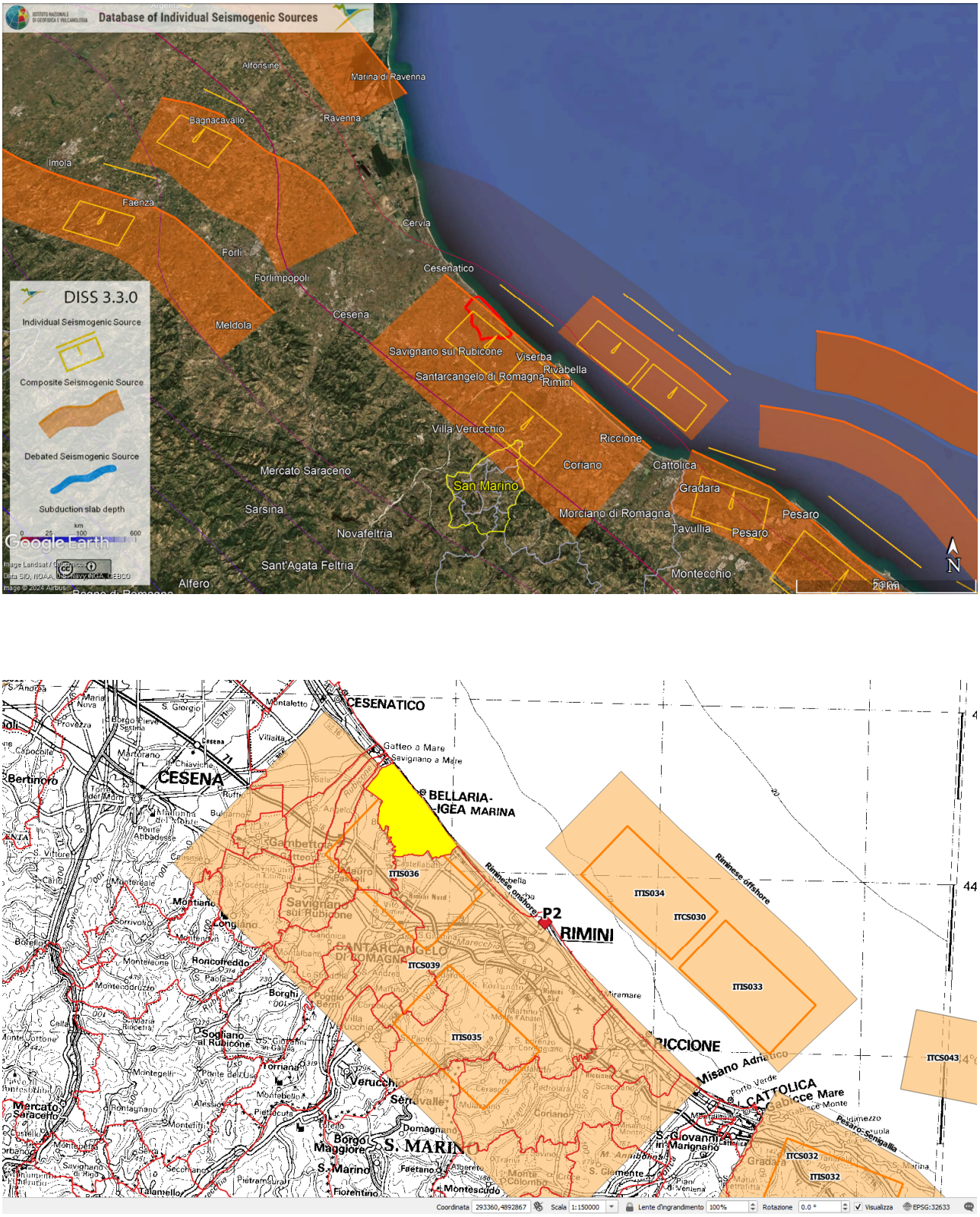






*Figura – 3.4: Sorgenti sismogenetiche (Id-Nome-Max Magnitudo) individuate dal catalogo DISS 3.3.0 (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.*

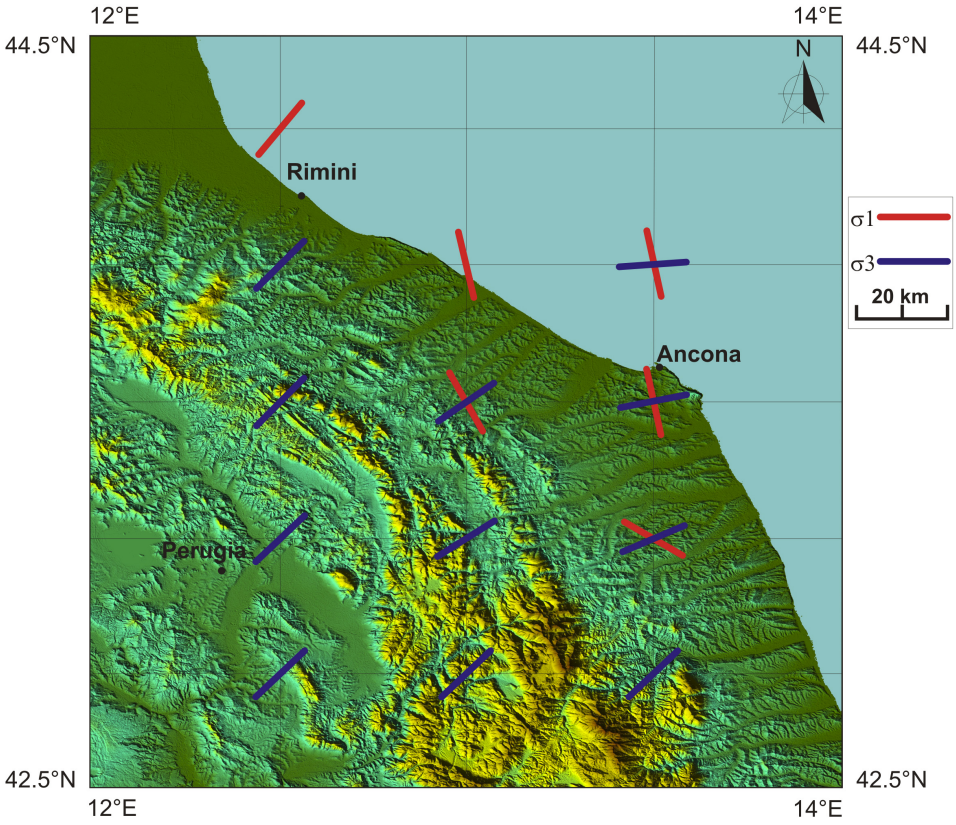



*Figura 3.5 – Proiezione in mappa degli assi di massima compressione (σ1) e minima compressione (σ3) per l'area umbro-marchigiano-romagnola (da Macchiavelli et alii, 2012).*

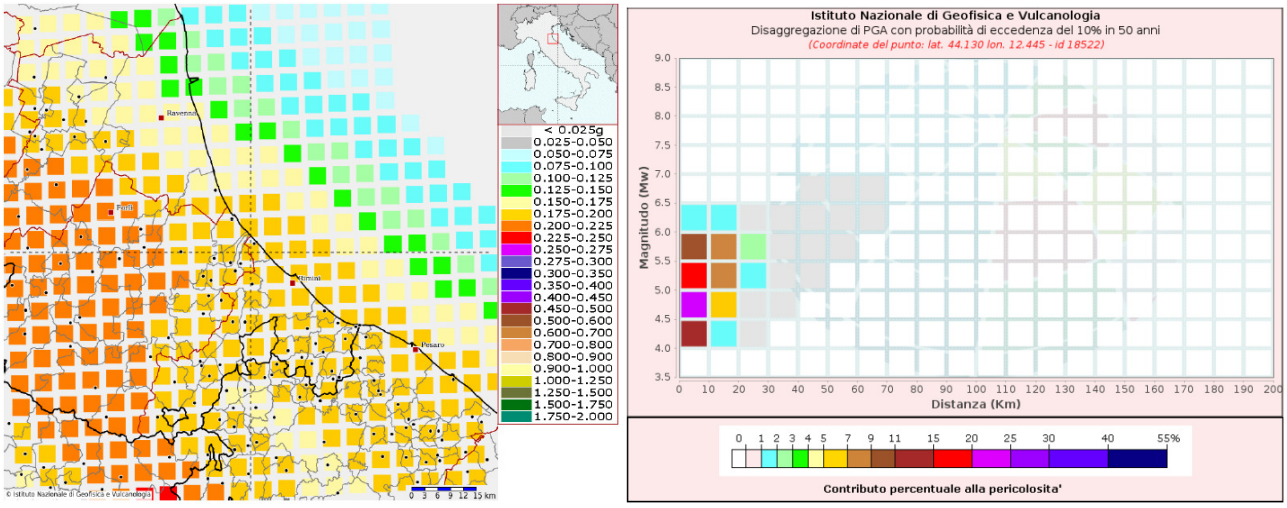
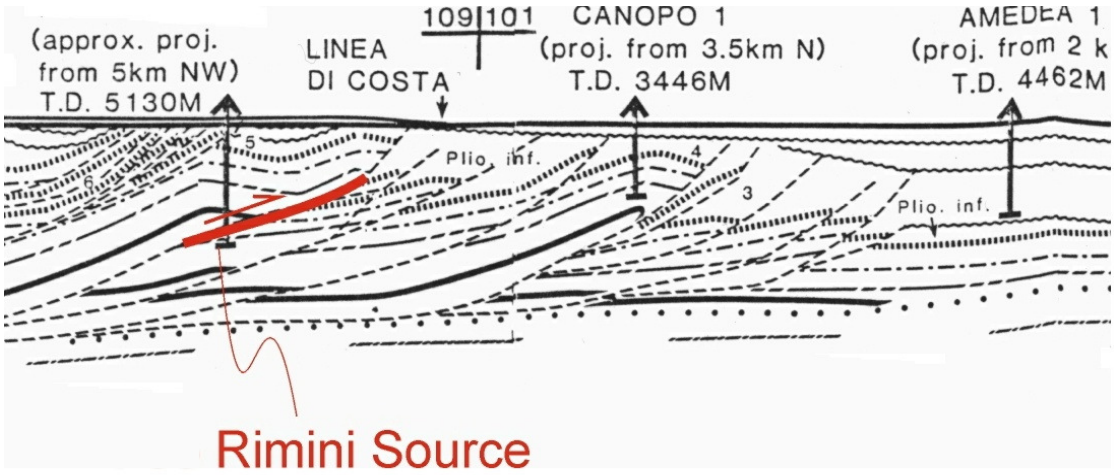



*Figura 3.6 – Diagramma di disaggregazione riferito alla zona baricentrale dell'area comunale di Bellaria-Igea Marina - Nodo INGV ID-18522*

Nelle tabelle 3.7, 3.8 e 3.9 vengono indicate le caratteristiche generali dei principali sistemi sismogenetici compositi **ITCS039-030 e ITIS036** sulla base di evidenze empiriche e dati di letteratura da catalogo DISS 3.3.0:

*Tabella 3.7 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS039 (da DISS 3.3.0).*

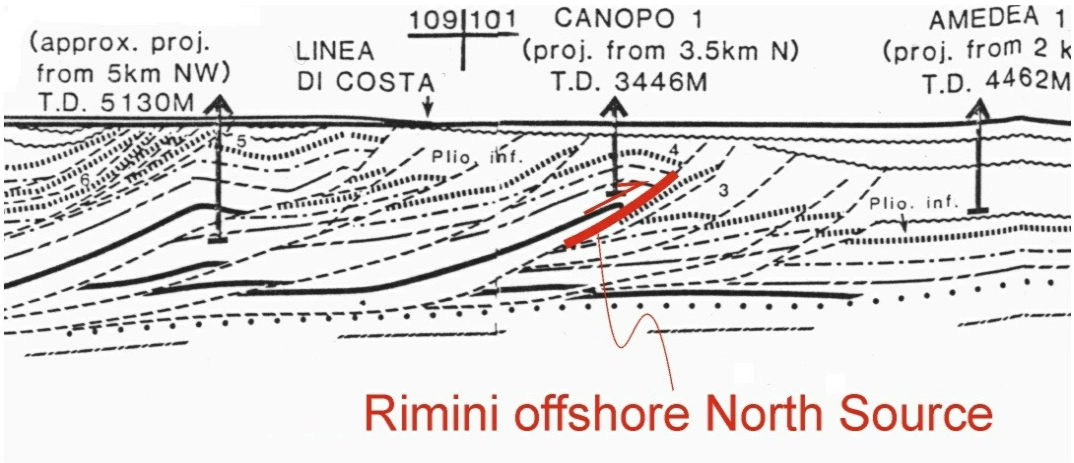
| **ITCS039 – RIMINESE ONSHORE** | |
|---|---|
| Min Depth (km) | 2 |
| Max Depth (km) | 10 |
| Strike (deg) | 120 - 140 |
| Dip (deg) | 25 - 35 |
| Rake (deg) | 80 - 100 |
| Slip Rate (mm/y) | 1.0 - 1.07 |
| Max Magnitude (Mw) | 7.0 |




*Sorgente sismogenetica ITCS039 - Riminese "on-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006*

*Tabella 3.8 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS030 (da DISS 3.3.0).*

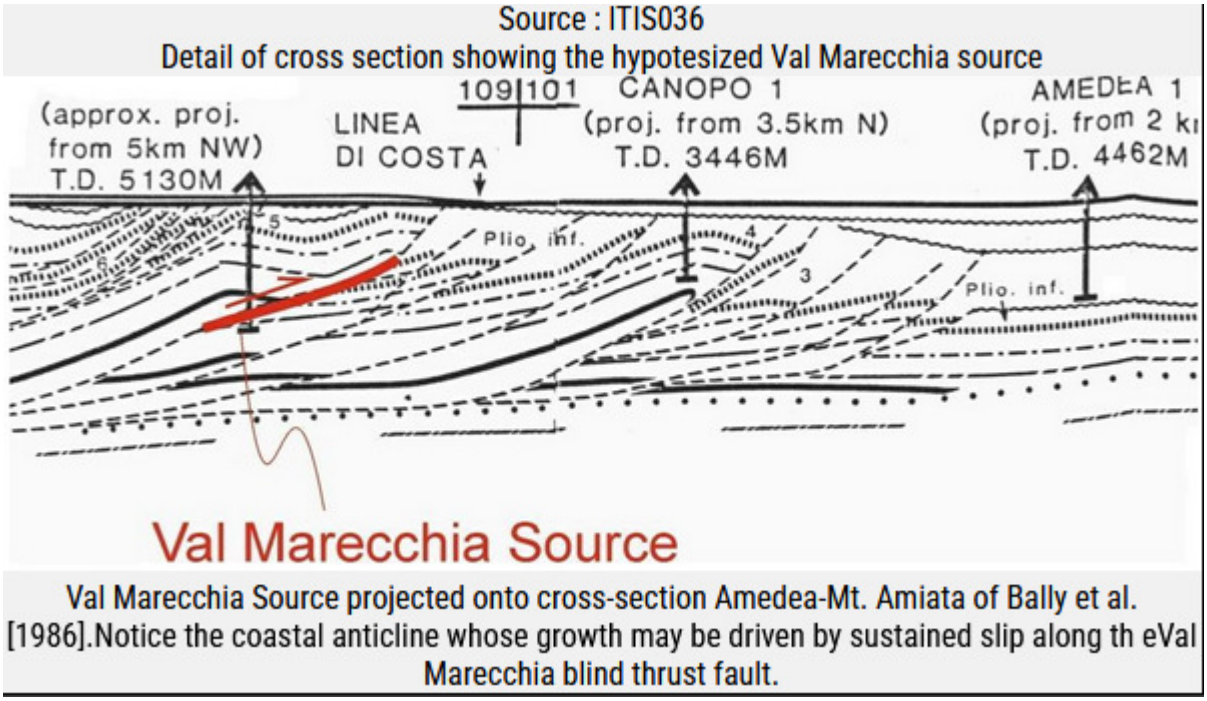
| **ITCS030 – RIMINESE OFFSHORE SOUTH** | |
|---|---|
| Min Depth (km) | 3 |
| Max Depth (km) | 7 |
| Strike (deg) | 120 - 140 |
| Dip (deg) | 25 - 35 |
| Rake (deg) | 80 - 100 |
| Slip Rate (mm/y) | 0.2 – 0.52 |
| Max Magnitude (Mw) | 6.2 |




*Sorgente sismogenetica ITC030 - Riminese "off-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006.*

*Tabella 3.9 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITIS036 (da DISS 3.3.0).*

| **ITIS036 – Val Marecchia** | |
|---|---|
| Min Depth (km) | 3 |
| Max Depth (km) | 6 |
| Strike (deg) | 132 |
| Dip (deg) | 30 |
| Rake (deg) | 90 |
| Slip Rate (mm/y) | 0.1 – 0.5 |
| Max Magnitude (Mw) | 5.7 |



Infine per quanto attiene la stima dei valori di Mw attesi nell'area può essere utilizzato lo studio ZS9 del 2004 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV), il quale è una rielaborazione della precedente sismozonazione ZS4 (Meletti et al, 2000), ripensata in base sia a nuove valutazioni del potenziale sismogenetico sia rispetto a nuove analisi eseguite sui terremoti storici e considerazioni statistiche.

La zona di studio ricade entro la zona "Rimini-Ancona" definita come ZS n. 917 (ad est) come evidenziato in figura 3.7.

Le caratteristiche associate a tali zone prevedono:

- Un meccanismo focale prevalente.
- Una Magnitudo Momento Massima "Osservata" (Mw-max1) definita sia dalle analisi legate agli eventi storici sia su basi geologiche legate al Database of Individual Seismogenic Sources (DISS).
- Una Magnitudo Momento Massima "Cautelativa" (Mw-max2) definita aggiungendo un margine di sicurezza rispetto alla Mw-max1 in relazione alle conoscenze strutturali, geofisiche e sismologiche.

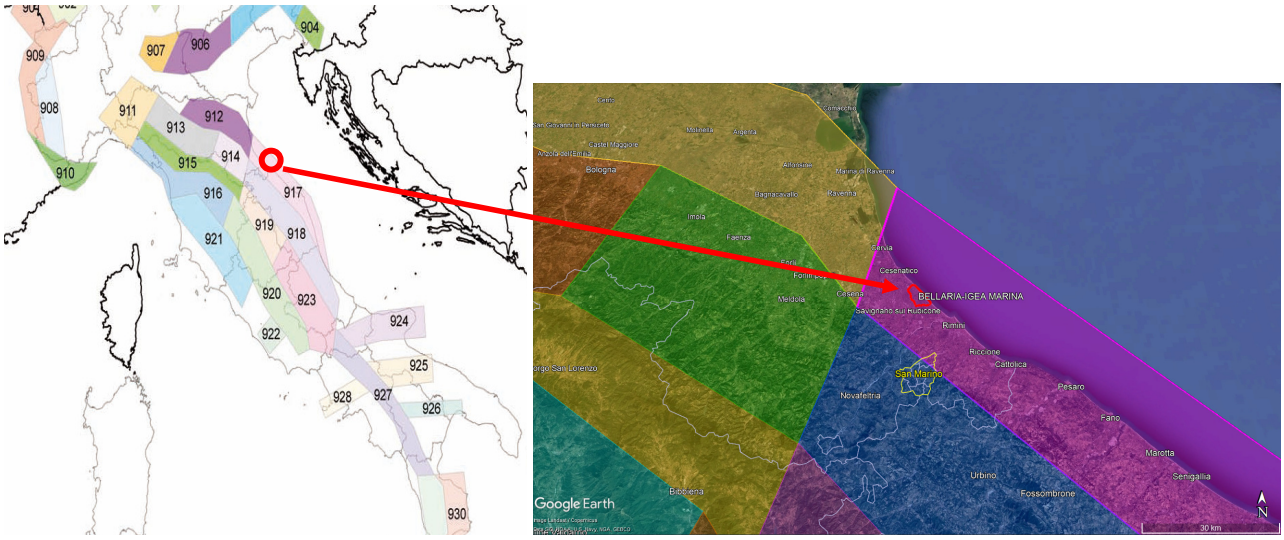


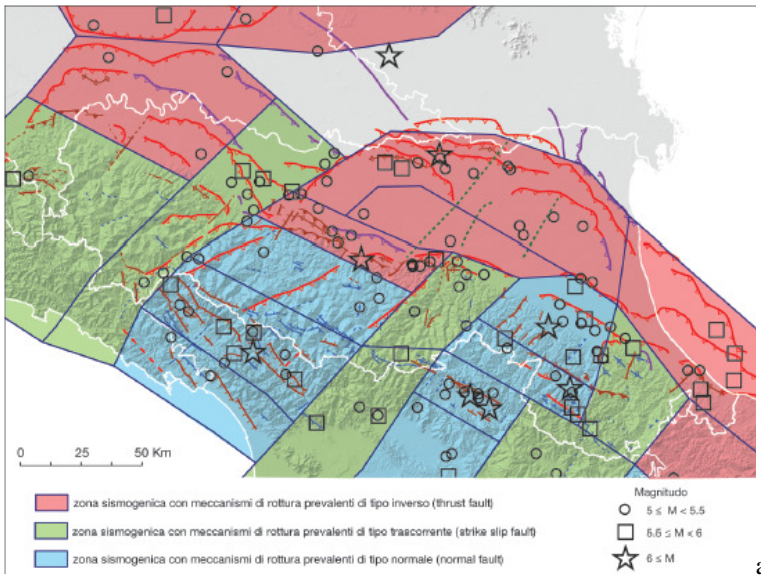

*Figura 3.7–Dettaglio della Zonazione Sismogenetica ZS9 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV, 2004). Evidenziata in viola la ZS n. 917 "Rimini-Ancona".*

Per cui in base alla zonazione ZS9 si possono assumere i seguenti parametri:

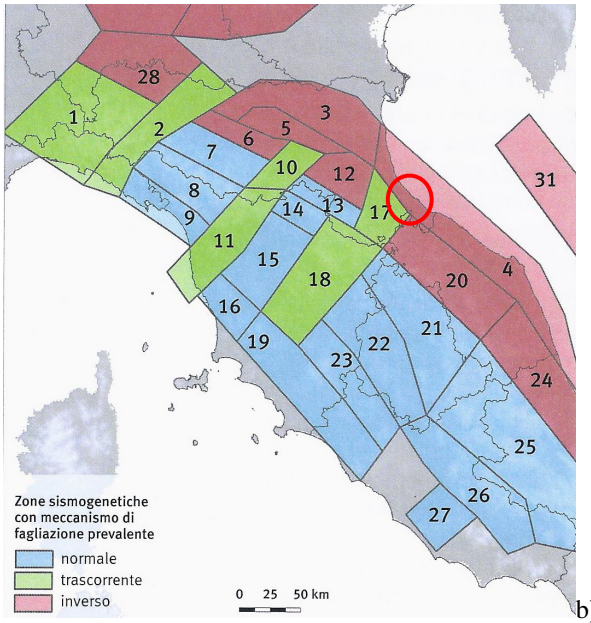
| | |
|---|---|
| **Zone** | **917** |
| **Meccanismo focale** | **inverso** |
| **Mw-Max** | **6.14** |

Tali valori risultano sostanzialmente in linea con la recente carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna – Edizione 2016, di cui in figura 3.8a e 3.8b se ne riporta uno stralcio illustrativo.

Anche in quest'ultima zonazione proposta dalla regione le aree in studio ricadono nella Zona 4, per la quale i meccanismi focali associabili alle principali faglie attive risultano prevalentemente di tipo inverso, con una orientazione caratteristica SW/30 (direzione di immersione) e profondità ipocentrali comprese fra 5-15 km; la magnitudo massima ivi osservata storicamente risulta pari a Mw=6.1, mentre quella massima calcolata per scenari futuri, sulla base dei modelli di analisi adottati, porta a valori pari a Mwmax= 6.16±0.21.




a)




b)

*Fig. 3.8 - Stralcio cartografia zonazione carta sismotettonica 2016 Emilia Romagna (a-b)*

In conclusione si può osservare come diversi terremoti significativi verificatisi nella storia sismica della romagna abbiano presentato delle magnitudo inferiori a 5/5.5 e grado di intensità MCS<7-8. Pertanto, considerati i cataloghi storici e le relative incertezze, gli studi dell'INGV, la zonazione ZS9 e le indicazioni I.C.M.S. nonché la recente Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, in relazione alle finalità e tipologia di studio, si ritiene adeguata una magnitudo momento massima di riferimento pari a **Mw=6.16**.

In figura 3.9 invece viene riportato un ulteriore dettaglio dell'area. Oltre alle zone sismogenetiche individuate dal DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia, in quest'altra figura vengono visualizzati gli andamenti delle principali faglie attive e capaci tratte dal catalogo *ITHACA* (ITHACA Working Group (2019). *ITHACA (ITaly HAzard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx*).

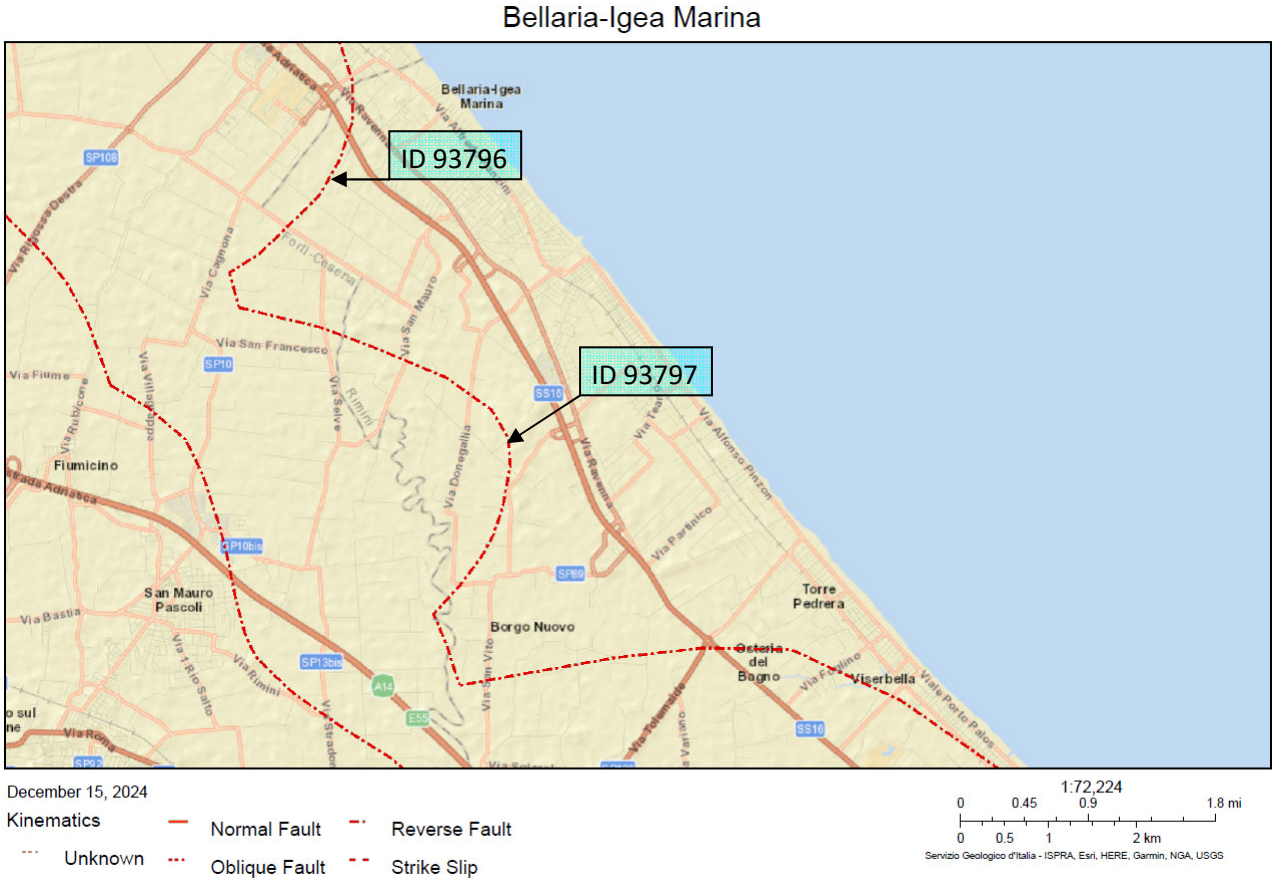



*Figura 3.9 – Dettaglio catalogo ITHACA delle faglie attive e capaci e relativo codice identificativo.*

Dalla figura si evince come il territorio comunale sia interessato da 2 strutture di faglia con cinematismo "inverso", a direzione prevalente NW-SE, denominate "Cesenatico - Ravenna" (Fault code 93796) e "F. Uso - Ravenna" (Fault code 93797); tuttavia i dati disponibili nel catalogo ITHACA riportano una scarsa conoscenza di tali strutture, trattandosi di sovrascorrimenti profondi post-tortoniani dedotti (da carta geologica Web-Gis Emilia Romagna), così come non ci sono evidenze superficiali su terraferma ne elementi noti su recenti attività, per cui la qualità delle informazioni è ritenuta bassa. Pertanto si può affermare che nel territorio oggetto di studio non vi siano situazioni accertate riconducibili a "zone di faglia attiva e capace" in grado di condizionare la pericolosità sismica locale e che, pertanto, possano essere segnalate negli studi di Microzonazione Sismica, come previsto negli I.C.M.S. (gruppo di lavoro MS 2008), nella versione 1.0 a titolo "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci FAC".

Per completare l'inquadramento sismico dell'area, in accordo con quanto descritto nell'Allegato A4 alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna zona significativa interna al Comune in studio è possibile, infine, calcolare lo spettro di risposta elastico a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) a partire da un moto di riferimento al bedrock ($a_{refg}$).

La definizione del moto sismico di riferimento (in termini di $a_{refg}$ al bedrock) si basa sui valori di pericolosità elaborati da INGV per il territorio nazionale resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi (circa 5.5 km) nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica Microzonazione Sismica".

Il valore di arefg relativo a ciascun sito analizzato si ottiene quindi interpolando i valori di *arefg* definiti nei punti della griglia più prossimi al sito oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino (nodi ID-18300, 18522 e ID-18523). Tale valore corrisponde all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock per lo spettro elastico normalizzato regionale e per cui:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato è rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%);
- i valori di *arefg* di ogni comune sono riferiti al 10% di probabilità di superamento in 50 anni;

In figura 3.11 viene illustrato uno stralcio di insieme della griglia di punti con i valori di $a_{refg}$ di riferimento sostanzialmente derivato dal progetto DPC-INGV-S1; invece in figura 3.12 viene illustrato un particolare con la posizione di dettaglio dei nodi ID-18300, ID-18522 e ID-18523, in base ai quali è stato suddiviso il territorio comunale per la stima delle azioni sismiche di riferimento e per le analisi di RSL per il III Livello di approfondimento.

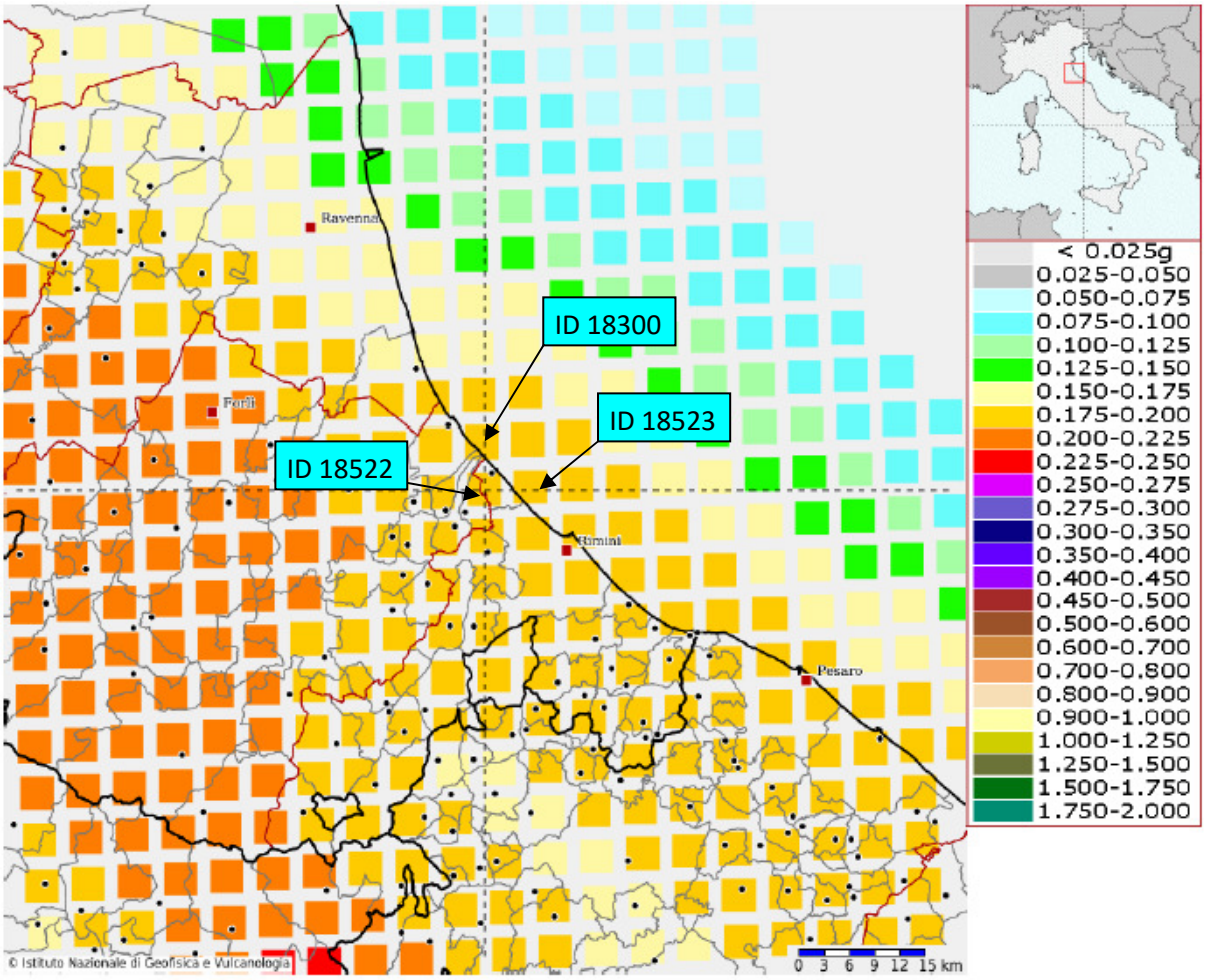



*Figura 3.11 – Dettaglio griglia punti di analisi $a_{refg}$ attraverso disaggregazione, progetto DPC-INGV-S1 Web-Gis*




*Figura 3.12 – Dettaglio linea di demarcazione (in blu) delle aree afferenti ai nodi ID-18520 (a sx) e ID-18521(a dx).*

# 4. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

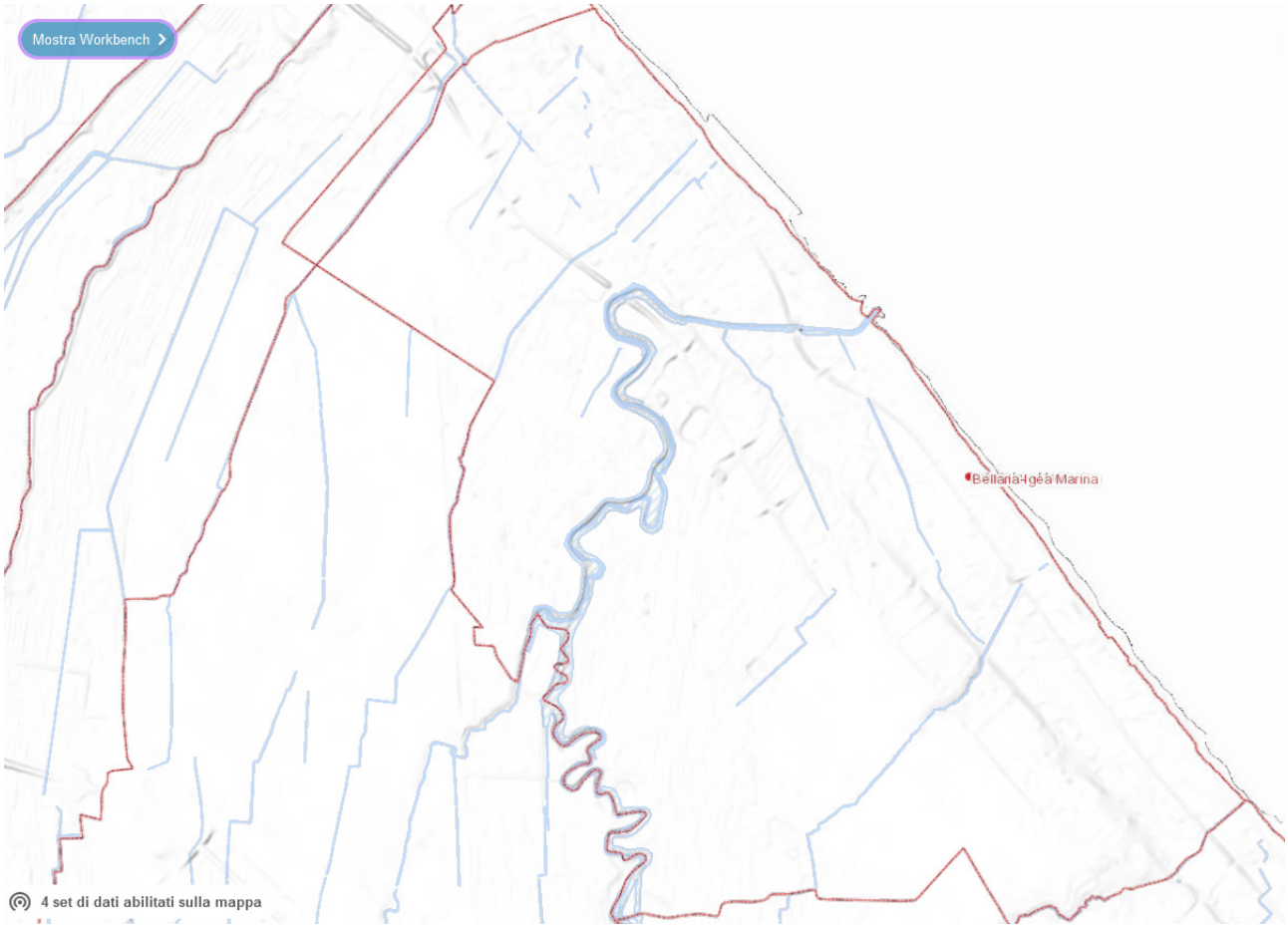
## *4.1. Cartografia di base*

Al fine di realizzare un corretto inquadramento del sito di interesse, è stata reperita la seguente documentazione pregressa:

- Carta Geologica D'Italia 256 (Rimini) scala 1:50.000 (Progetto Carg).
- Banca Dati della Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna.
- Quadro Conoscitivo PTCP Provincia di Rimini
- Piano dell'Arenile Comune di Bellaria – Igea Marina
- PSC del Comune di Bellaria – Igea Marina.
- Microzonazione Simica Comune di Bellaria – Igea Marina, OPCM 4007/2012, anno 2014

## *4.2. Inquadramento geomorfologico*

Il territorio del comune di Bellaria – Igea Marina è caratterizzato da una morfologia sostanzialmente pianeggiante sviluppato prevalentemente in ambito costiero e di pianura alluvionale.




**Assetto morfologico del territorio del Comune di Bellaria – Igea Marina**

Come si può osservare dalla carta sopra riportata, il settore nord orientale del territorio in studio è caratterizzato principalmente da una morfologia costiera prossima la livello del mare, modellata dai processi fluviali e dall'interazione con le correnti costiere. Subito alle spalle (procedendo verso SW) si sviluppa il reticolo idrografico principale e minore nell'ambito di un contesto di piana alluvionale. La piana costiera risulta contraddistinta da depositi superficiali prevalentemente sabbiosi, mentre la pianura alluvionale retrostante è dominata da depositi limoso-argillosi di elevato spessore (vedi figura sottostante), con strutture deposizionali ed erosive originate dall'azione dei corsi d'acqua locali.




Le quote massime e minime rilevabili nell'ambito del territorio comunale, espresse in metri sul livello del mare, sono riportate nella seguente tabella riassuntiva:

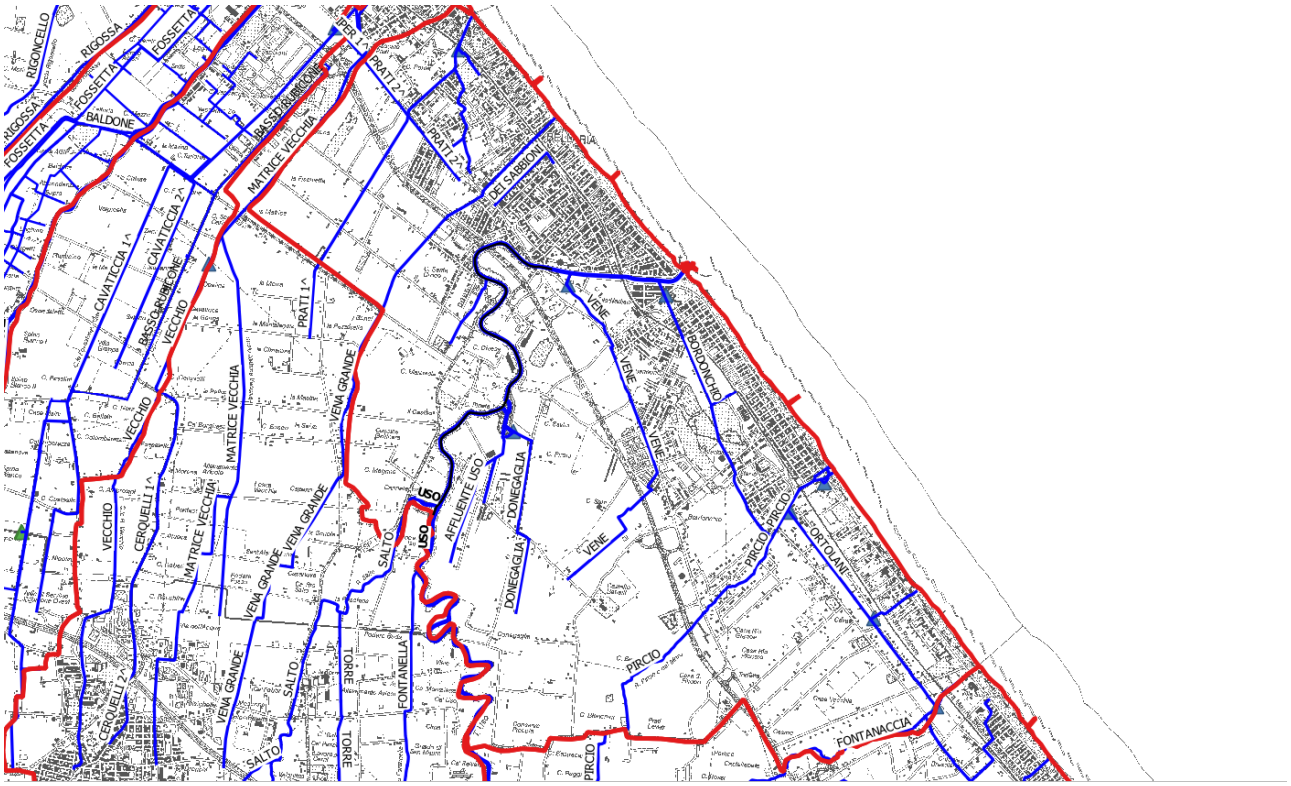
| Comune | Altitudine Minima | Altitudine Massima | Altitudine Media |
|---|---|---|---|
| **Bellaria – Igea Marina** | 0 | 14 | 3 |

La fascia costiera, congiuntamente al centro cittadino, ospita la maggior densità urbanistica e le principali infrastrutture ferroviarie e portuali, inserite in ambito a spiccata attività turistica. I comparti produttivi ed artigianali si sviluppano invece prevalentemente nelle aree di pianura retrostanti, in prossimità della rete viaria principale contraddistinta dalla SS. Adriatica che corre parallelamente alla piana costiera.

Per quanto riguarda la rete di scolo principale essa è rappresentata dal Torrente Uso, il quale divide il comune nelle due località principali: Igea Marina a Sud e Bellaria a Nord, mentre il reticolo secondario è costituito da rii, scoli e fossi caratterizzati da bacini idrografici più modesti, ad andamento prevalentemente subparallelo al corso principale, che incidono localmente la paleofalesia e sfociano a mare perpendicolare alla costa. Tuttavia la superficie topografica presenta alcune irregolarità ed ampie depressioni,

prevalentemente in corrispondenza della zona centrale e settentrionale della piana costiera, con quote più basse rispetto al contesto contermine (talora di soli alcuni decimetri superiori allo zero); queste zone sono ricomprese tra quelle a maggior problematicità per lo scolo delle acque superficiali e presentano le criticità più rilevanti comportando, talora e soprattutto nei tratti al piede della paleofalesia, repentini cambi di direzione del proprio percorso (a volte anche entropici), deviandolo a nord longitudinalmente a tali elementi morfologici. Tali corsi d'acqua secondari risultano spesso parzialmente tombinati e integrati nella rete di scolo urbana e di smaltimento delle acque piovane di cui i più importanti, procedendo verso nord, risultano essere: Scolo Pedrera Grande, Rio Pircio, Scolo Consorziale Vena. I corsi d'acqua locali, sfociando direttamente a mare e con un basso gradiente di deflusso, generalmente presentano criticità in cui il deflusso delle acque è ostacolato dalle mareggiate e dall'insabbiamento delle foci e/o dei manufatti di sbocco, generando occasionalmente alluvionamenti più o meno estesi in funzione anche della morfologia locale.

Lo schema generale del reticolo idrografico nel territorio comunale è riportato nella seguente carta di inquadramento generale.




**Carta del reticolo idrografico principale**

In linea generale, anche per i corsi d'acqua principali, si tratta di corsi d'acqua a carattere torrentizio con forti magre estive e piene nei periodi autunno-invernali. Tale regime di portate è chiaramente imputabile al regime pluviometrico (deflussi legati agli afflussi meteorici), congiuntamente al modesto bacino idrografico ed alla presenza di terreni scarsamente permeabili (argille, limi argillosi).

### *4.3 Inquadramento geologico-strutturale*

Il bordo appenninico esterno e l'attuale fascia costiera sono il prodotto del sistema ad embrici e accavallamenti che regola il sollevamento e lo sviluppo della catena appenninica.
Secondo le recenti ricerche dell'AGIP (Pieri e Groppi, 1981) la Pianura Padana meridionale costituisce una stretta fascia allungata parallelamente ai rilievi del bordo appenninico entro cui si è verificato un consistente accumulo di depositi soprattutto neogenici. La presenza di strutture tettoniche sepolte drappeggiate ed annegate da tali depositi, storicamente ipotizzata, è stata accertata attraverso la realizzazione di "sezioni sismiche".
Lungo il bordo appenninico esterno e la fascia di pianura antistante gli elementi strutturali accatastati vengono a formare un prisma di accrezione che per la complessa interferenza tra l'attività tettonica e quella sedimentaria assume i caratteri di una pronunciata fossa tettonica (Scandone, 1980) denominata "Avanfossa appenninico-adriatica" (Ori G.G., Roveri M.e Vannoni F., 1986). L'intrecciarsi di complessi meccanismi sedimentari e tettonici hanno dato luogo alla formazione di bacini alla fronte e sulla parte retrostante degli accavallamenti traslando con essi all'interno della avanfossa. Il risultato finale è quello di un consistente impilamento di sedimenti caratteristici della successione sedimentaria plio-peistocenica sino a quelli olocenici della zona di studio.
Di seguito si riporta uno schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Servizio Geologico, 2004) e una sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009) (Figure 4.1 e 4.2).

La tettogenesi della nostra area inizia nel Tortoniano, in corrispondenza di una fase tettonica molto accentuata ad occidente, quando la fascia romagnolo - marchigiana interna, ubicata sul fronte della catena, costituisce una depressione fortemente articolata in piccoli bacini con sviluppo parallelo all'asse appenninico ("Bacini minori intrappenninici"; Ricci Lucchi, 1975). Il bordo appenninico esterno e l'avanfossa appenninico - adriatica propriamente detta, iniziano a delinearsi durante il Messiniano migrando nella fascia esterna e trovano il loro massimo sviluppo nel pliocene inferiore quando la tettogenesi appenninica raggiunge il suo acme e la catena si estende ormai su tutta l'area.

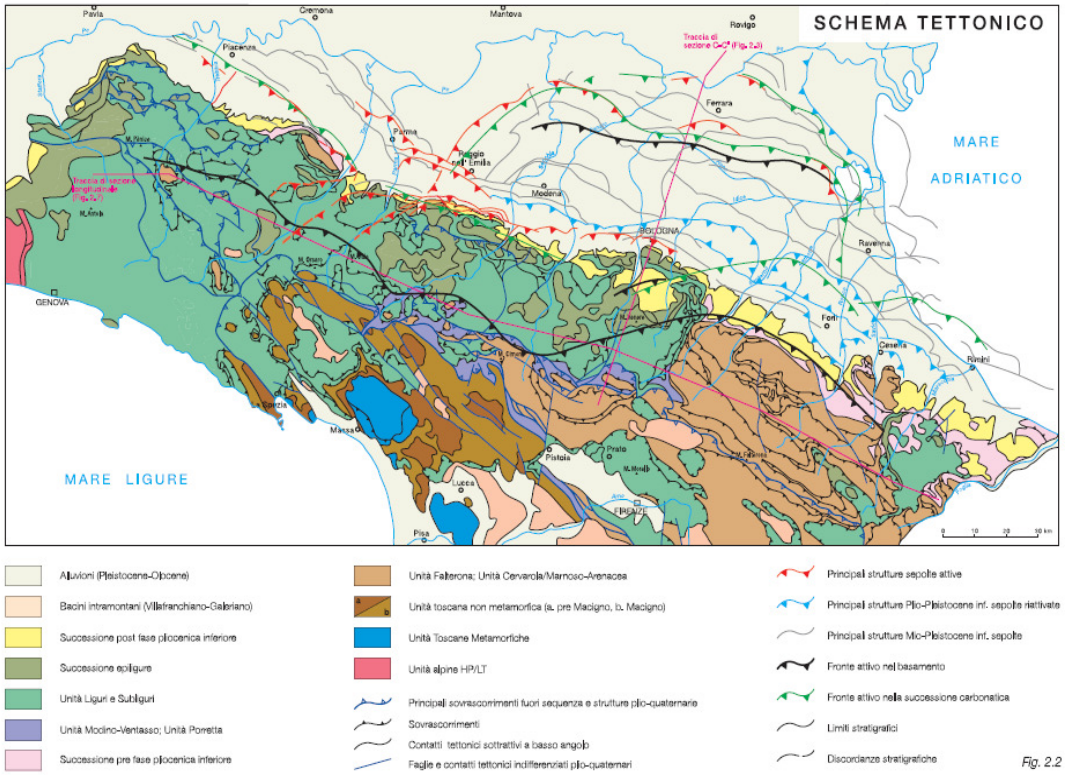



*Figura 4.1 – Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna.*

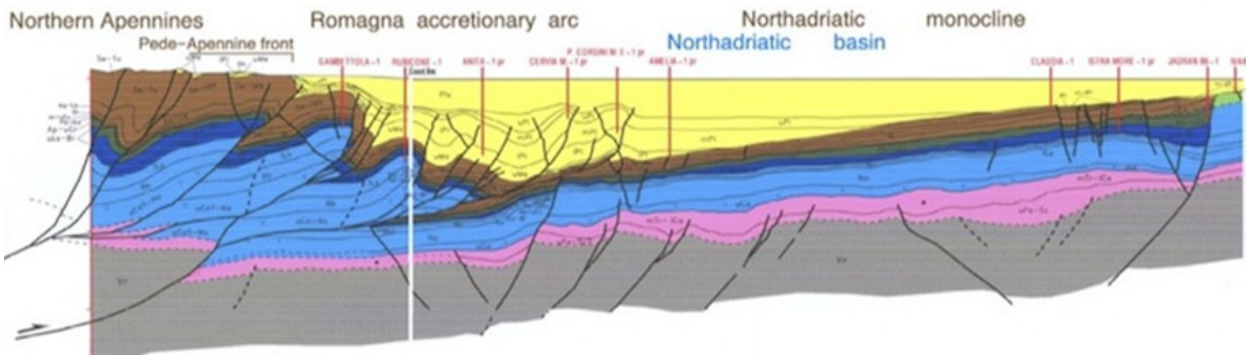



*Figura 4.2 – Sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009)*

Durante il pliocene medio - superiore la distensione, legata all'avanzamento del fronte estensionale tirrenico, comincia ad interessare la parte più interna della catena mentre i principali fronti compressivi sono ubicati nella fascia romagnolo - marchigiana esterna determinandone il sollevamento e la parziale emersione.

Nel pleistocene inferiore - medio i fronti compressivi migrano in Adriatico. Si hanno movimenti differenziali verticali delle aree che continuano anche nel "Pleistocene glaciale" influenzando lo sviluppo e la tipologia della sedimentazione. L'attività tettonica non si è ancora esaurita, almeno nella fase avanzata dell'orogenesi (Pianura Padana, Adriatico) come è dimostrato dalla frequente attività sismica della regione. Lo schema tettonico-strutturale generale è quindi apprezzabile nelle figure 4.3 e 4.4.

### *4.4 Assetto stratigrafico*

Le caratteristiche geologiche del territorio comunale non risultano di particolare complessità; esso comprende infatti le alluvioni continentali terrazzate della pianura (Pleistocene- Olocene) e i depositi costieri (Olocene-attuali).

Dal punto di vista geologico-idrogeologico il territorio comunale si inserisce all'estremità settentrionale della conoide deposizionale del F. Marecchia, entro un settore in cui la morfologia e le strutture deposizionali più recenti sono determinate dall'azione del Torrente Uso, che attraversa i depositi alluvionali presenti nei settori più interni sino a sfociare in mare.

Verso mare questi sono interrotti dal gradino morfologico della paleofalesia, a valle della quale sono presenti depositi sabbiosi di transizione di origine litorale, lagunare e marina. Tali depositi costituiscono la piana costiera, estesa tra la falesia fossile e l'attuale linea di costa, secondo una tipica morfologia pianeggiante, caratterizzate da un'ampia piana sabbiosa originata dall'interazione tra processi continentali (alluvionali) e marini (litorali). La quota altimetrica della piana costiera è generalmente compresa tra lo zero del livello marino medio e +1,4/+1.8 ml s.l.m., con la quota media lievemente calante procedendo verso N.

Per il territorio comunale di Rimini sono, dunque, state individuate 3 principali macro-aree:

- MACROAREA LITORALE: comprende la zona litorale e di piana costiera.
- MACROAREE ALLUVIONALI: comprende la piana alluvionale marginale del sistema del Torrente Uso che si sviluppa verso l'ultima propaggine settentrionale della conoide del Marecchia e della provincia di Rimini.

Di seguito è riportata una breve descrizione delle caratteristiche geo-litologiche di ciascuna macro-area rilevata.

MACROAREA LITORALE

L'estensione lineare del tratto costiero consente un'azione piuttosto regolare da parte delle correnti litorali e la formazione di una fascia sabbiosa estesa anche a distanza dalle foci fluviali che hanno costituito e costituiscono attualmente in misura meno rilevante, le fonti di alimentazione per lo sviluppo del sistema deposizionale litorale. In conseguenza dell'intensa urbanizzazione, talora spinta fino al limite della zona di azione del moto ondoso di tempesta, alcune caratteristiche morfologiche del paesaggio costiero quali cordoni e dune sabbiose sono scomparse, lasciando spazio ad estese aree urbanizzate ed ad un diffuso appiattimento degli arenili a seguito dell'intensa attività turistico-balneare.

La larghezza dell'arenile dipende dalle correnti marine che determinano zone di deposizione e d'erosione, dalla migrazione delle foci nel tempo, dalla presenza di manufatti trasversali quali porti, moli, scogliere ed in genere tutte le opere antropiche, che modificano il regolare sviluppo delle correnti stesse, infine dalla presenza di manufatti longitudinali che condizionano la deposizione in particolare a seguito di mareggiate.

Spostandosi verso l'entroterra, localmente ad una distanza variabile da circa 600 ml sino a 900 ml dalla linea di riva, al di la della fascia di lidi (ora urbanizzata), è evidente un gradino morfologico di alcuni metri. Tale salto di pendenza determina un terrazzamento costiero localmente modellato dalle lavorazioni agricole e linearmente esteso lungo tutta la provincia di Rimini, se si eccettua l'interruzione centrale nell'intorno della foce del Fiume Marecchia e in corrispondenza della sua terminazione settentrionale, a breve distanza dal corso del T. Uso. Il dislivello tra i terreni alluvionali ed i sottostanti depositi costieri, si aggira sui 6/7 m in prossimità dello Scolo Pedrera Grande, riducendosi progressivamente a 4/5 m in corrispondenza del Rio Pircio, a 2.5 m all'altezza di Viale Orazio per annullarsi quasi completamente in prossimità dell'alveo del fiume Uso.

I depositi sabbiosi di litorale sono riconducibili all'ultima glaciazione che abbassò il livello marino circa 100 mt al di sotto del livello attuale. La linea di costa si trovava tra Pescara e Zara nord, dalla quale si sviluppava un'ampia pianura alluvionale solcata dai corsi d'acqua che erano affluenti del Po. Le conoidi create dai fiumi sono costituite da elevati spessori ed attualmente le loro terminazioni si ritrovano in mare a distanze notevoli dall'attuale linea di costa. Con l'alternarsi di fasi di glaciazioni e di seguenti miglioramenti climatici (scioglimento dei ghiacci) il livello del mare subì abbassamenti ed innalzamenti determinando conseguenti regressioni e trasgressioni delle acque marine sulle terre emerse e viceversa.

La falesia, composta da depositi limo-argillosi recenti, rappresenta il limite tra la pianura alluvionale a S.O. ed il prisma sedimentario sabbioso litorale a N.E. riferibile alla trasgressione Flandriana (Olocene) successiva all'ultima glaciazione (Wurm). La scarpata rappresenta il prodotto dell'azione erosiva del mare durante la fase di massima ingressione verificatasi circa 5.000 anni fa (Veggiani, "La linea di spiaggia"). Successivamente le variazioni oloceniche del livello marino hanno portato la linea di riva a lambire più volte la falesia.

La regressione marina dell'ultimo millennio ha creato lo scenario attuale dove l'avanzata della spiaggia sul mare generalmente è stata nettamente prevalente almeno fino agli ultimi decenni.

La serie marina che ricopre in contatto discordante quella alluvionale (trasgressione Flandriana) è costituita da sabbie medie o medio-fini, generalmente ben classate, con laminazione a basso angolo cuneiforme o concavo - convessa, talora evidenziata da allineamenti di livelli di frustoli vegetali. Localmente si possono rinvenire alternanze sabbioso-limose e limo-argillose, che denunciano un'elaborazione incompleta dei sedimenti di apporto alluvionale da parte del moto ondoso. Le strutture sedimentarie rivelano una situazione di media-elevata energia deposizionale, in ambienti di mare basso o litorale dominati dal moto ondoso e/o da correnti lungocosta. La presenza occasionale di ghiaie in livelli organizzati e con ciottoli ben arrotondati, denota sia la vicinanza di fonti d'apporto grossolano, sia elaborazione da parte delle correnti costiere e del moto ondoso.

La scarpata netta della paleofalesia incide i depositi continentali in modo ben riconoscibile soprattutto nella zona a nord del F. Marecchia, da Rivabella sino alla sua terminazione settentrionale ad Igea Marina, mentre

ad esempio, in corrispondenza dell'abitato di Rimini, risulta occultata dall'urbanizzazione e più a sud appare poco percettibile, diventando nuovamente apprezzabile da Riccione verso sud.

Il prisma sabbioso marino, coerentemente a quanto rilevato lungo la costa della provincia riminese in Merli A. (Tesi di dottorato, 2019), è generalmente organizzato secondo due unità stratigrafiche e litotecniche arealmente continue e sovrapposte denominabili, partendo dall'alto, rispettivamente come A e B (vedi Figura 4.3 e 4.4).

Nel litorale studiato l'Unità A, (corrispondente all'unità stratigrafica superficiale AES8a) è presente sino a profondità di circa 2.0-4.0 mt da p.c., risultando costituita da sabbie generalmente cernite, omogenee, maggiormente addensate e con diametro medio leggermente superiore rispetto ai depositi caratteristici della sottostante Unità B, sempre caratterizzata da prevalenti sabbie ma organizzate secondo alternanze con livelli a maggior contenuto in fine congiuntamente ad un minor grado di addensamento. Nel settore di chiusura a pinch-out contro la paleofalesia, alla base del cuneo sabbioso, sono sovente presenti depositi ghiaiosi addensati (presso Rimini Nord) o depositi sabbiosi più grossolani (a tratti con ghiaietto) ed addensati, talora con presenza di frammenti conchigliari (vedi Figura 4.3).

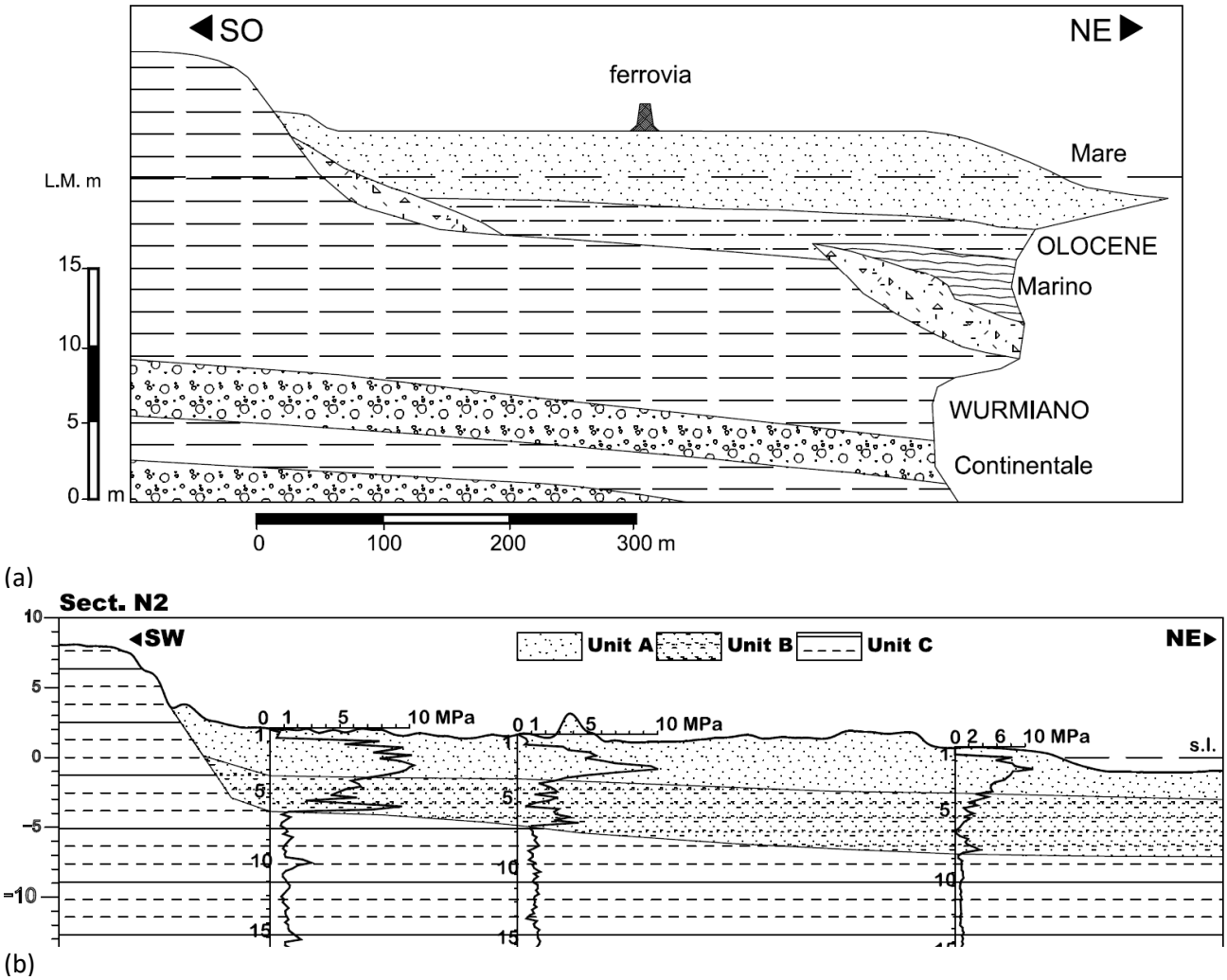



*Figura 4.3 – (a) Tipica sezione geologica costiera (Veggiani, 1982); (b) Sezione geotecnica N2 lungo il tratto di Rimini Nord (RNN) (Merli A., 2019).*

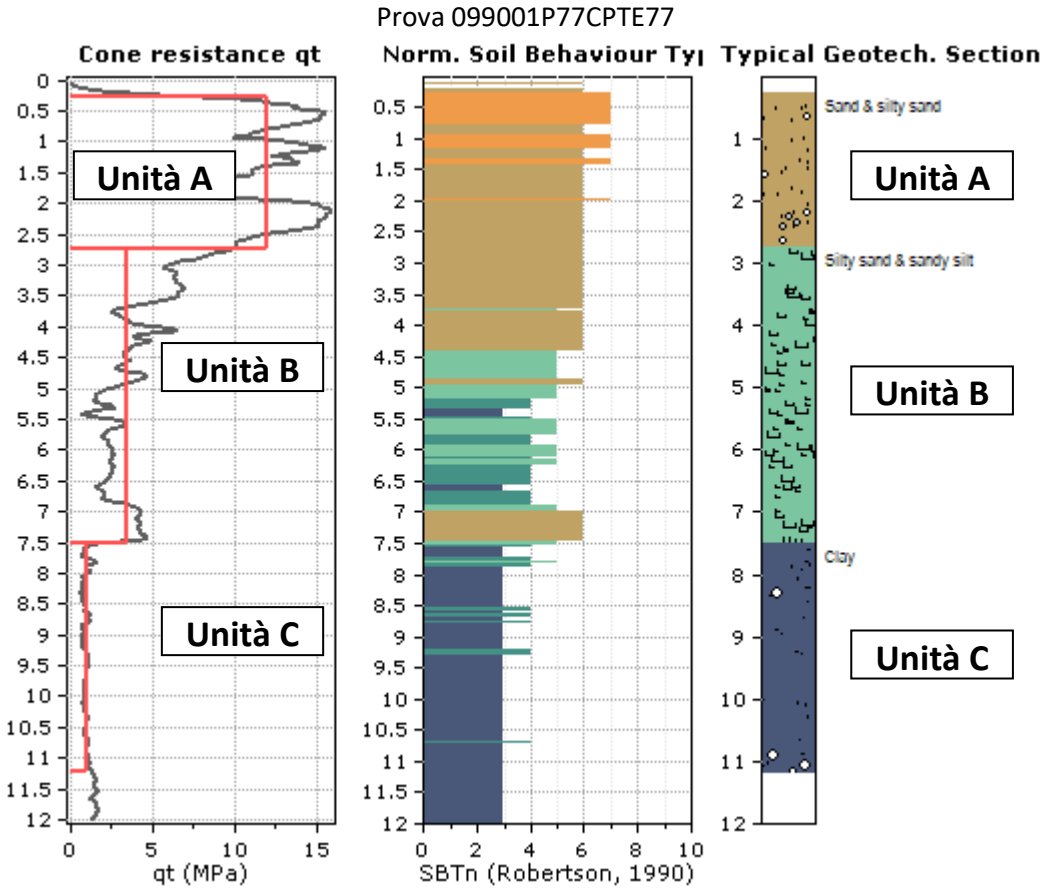
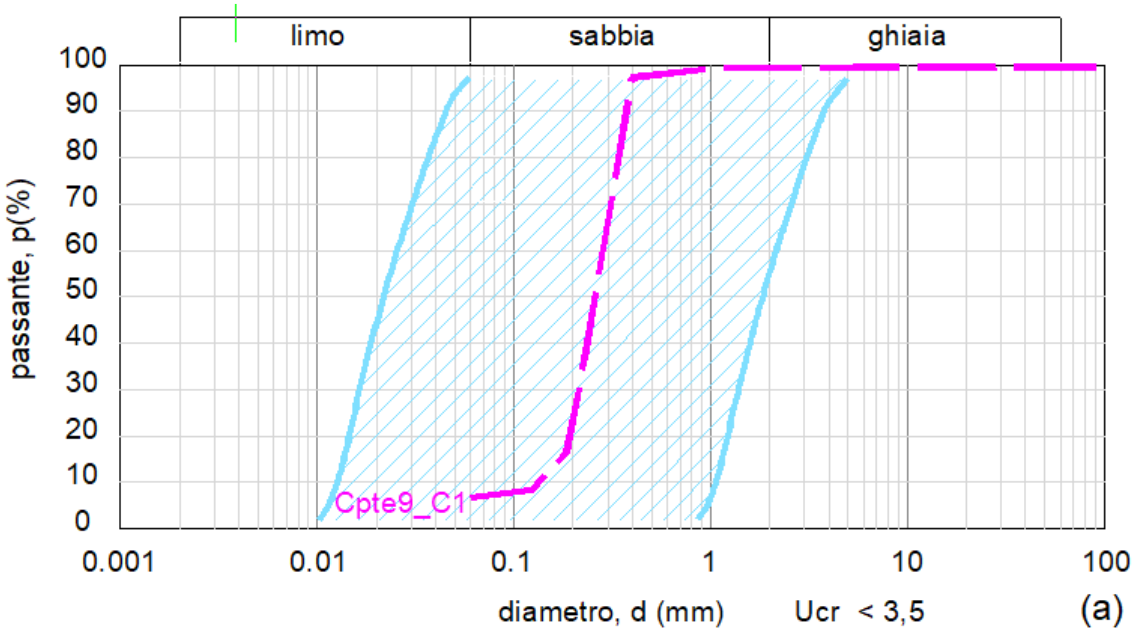



*Figura 4.4 - Tipica sequenza litotecnica costiera (Unità A-B-C) in termini di resistenza alla punta qc e indice Ic SBTn (Normalized Soil Behavior Type).*



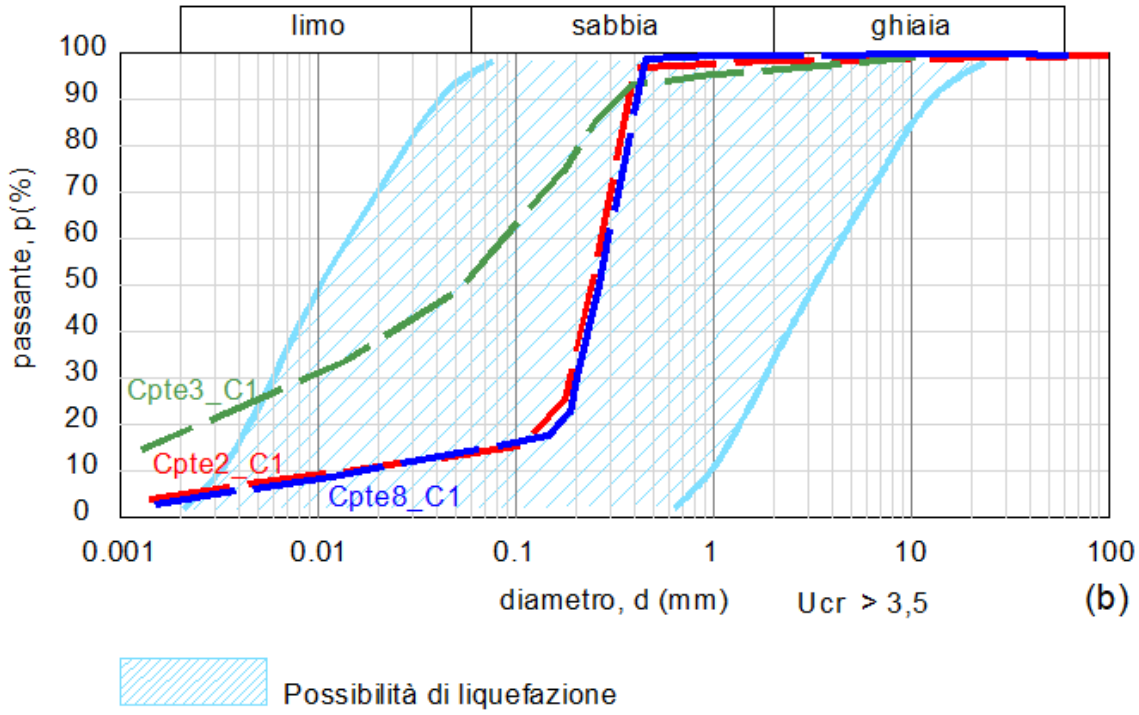



*Figura 4.5 – Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione di terreni a granulom,etria uniforme (a) ed estesa (b) (AGI, 2005)..*

La distribuzione granulometrica generale dei campioni prelevati entro l'unità A (Fig. 4.5) risulta sempre ricompresa entro i fusi di possibilità d liquefazione, con la parziale eccezione del campione Cpte3_C1, prelevato in corrispondenza del tratto di chiusura a monte del cuneo sabbioso in prossimità dell'alveo del T. Uso.

I depositi alluvionali di letto, a livello litotecnico, vengono identificati quale Unità C, alla cui sommità possono talora presenti circoscritti orizzonti metrici di ghiaie, quali strutture relitte di paleoalveo dei corsi d'acqua locali e/o di barra di foce oppure orizzonti metrici di limi e argille compressibili ed a significativo contenuto organico. Le sezioni litostratigrafiche/litotecniche superficiali di riferimento, rappresentative per i vari settori del territorio costiero studiato, unitamente alla loro ubicazione, sono riportate in allegato alla presente e denominate 1-1', 2-2', 3-3', in cui le sopracitate Unità litotecniche A, B e C sono rispettivamente identificabili con i litotipi SW, SM, ML, OH, come da codifica nella tabella di classificazione dei terreni (par. 2.1.9.1 degli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Versione 4.2); in tali sezioni gli orizzonti ghiaiosi presenti talora al tetto dell'Unità C sono individuabili con la sigla GM. Tale assetto viene altresì schematizzato nelle colonnine stratigrafiche 2005 - 2006 - 2007 - 2008 di cui alla carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica) ed al successivo Par. 6.3.

Tali terreni superficiali costieri, secondo il criterio geologico di Youd e Perkins (1978), basato su natura ed età del deposito, presentano una moderata-alta suscettibilità alla liquefazione (vedi fig. 4.6).

| Tipo di deposito | Probabilità di liquefazione di depositi sedimentari durante terremoti Strong Motion | | | |
|---|---|---|---|---|
| | < 500 anni | Olocene | Pleistocene | Pre-Pleistocene |
| **a) Depositi continentali** | | | | |
| Canale fluviale | Molto alta | Alta | Bassa | Molto bassa |
| Pianura di esondazione | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Pianura e conoidi alluvionali | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Spiagge e terrazzi marini | | Bassa | Bassa | Molto bassa |
| Deltaici | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Lacustri | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Dune | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Loess | Alta | Alta | Alta | Sconosciuta |
| Terreni residuali | Bassa | Bassa | Molto bassa | Molto bassa |
| **b) Zone costiere** | | | | |
| Deltaici | Molto alta | Alta | Bassa | Molto bassa |
| Di estuario | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Di spiaggia | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| Lagunari | Alta | Moderata | Bassa | Molto bassa |
| **c) Riempimenti artificiali** | | | | |
| Non compattati | Molto alta | | | |
| Compattati | Bassa | | | |

*Figura 4.6 -. Criterio geologico di verifica della suscettibilità alla liquefazione secondo Youd e Perkins (1978).*

MACROAREE ALLUVIONALI

I depositi continentali sono per lo più sedimentati per opera delle acque del Fiume Marecchia, principale corso d'acqua del riminese che. con le improvvise e notevoli piene, ha originato la relativa conoide de posizionale con alternanze di ghiaie più o meno grossolane, limi, argille e sabbie. Nell'area del comune in studio, presso i settori costieri, la conoide presenta il maggior spessore, sino ad oltre 300 mt. Procedendo da monte verso mare e da S verso N la frequenza e spessore delle strutture ghiaiose di paleolaveo (vedi figura 4.7 sottostante e Allegato 2 - sezioni geologiche 4-4', 5-5', 6-6', 7-7', 8-8' e 9-9') tende a diminuire. Essi formano corpi a geometria nastriforme, larghi sino a qualche centinaio di metri, che incidono con contatto netto ed erosivo le tracimazioni fluviali adiacenti (canali singoli di piana alluvionale).

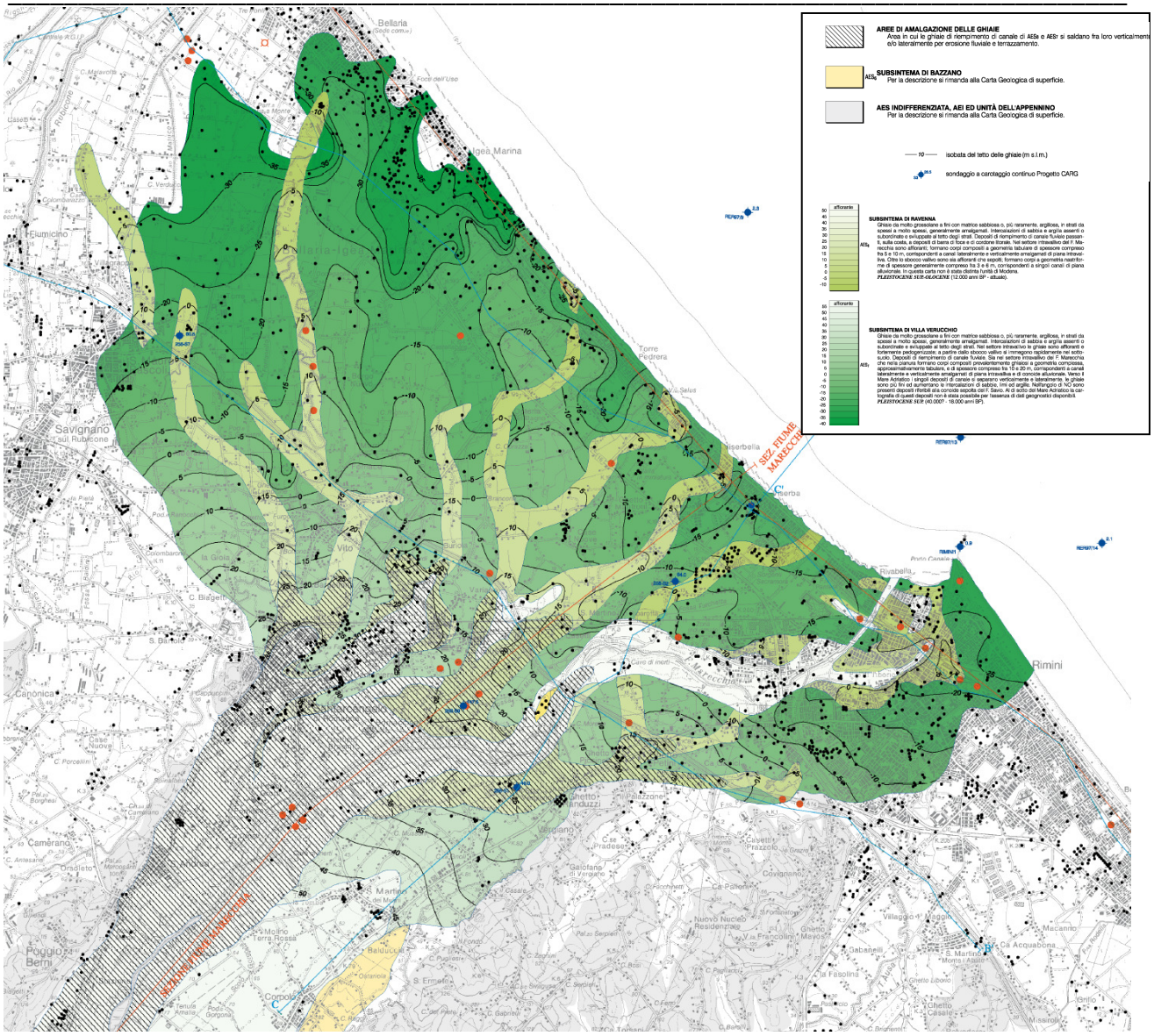



*Figura 4.7 – Estratto della carta del tetto delle ghiaie della conoide alluvionale del Fiume Marecchia.*

Più in superficie depositi alluvionali di minore entità si hanno per opera del Fiume Uso che si interdigitano con quelli del Fiume Marecchia.

I depositi alluvionali appartengono al Sintema Emiliano - Romagnolo superiore (AES), all'interno del quale vengono individuati il Subsintema di Ravenna ($AES_8$) e l'Unità di Modena ($AES_{8a}$), costituiti essenzialmente da materiali grossolani (sabbie e ghiaie) alternati a materiali a granulometria più fine (limi e argille); questi ultimi, in corrispondenza del terrazzo superiore, occupano la parte più superficiale del deposito. In profondità ed al crescere dell'età dei cicli deposizionali (e corrispondenza dei terrazzi più alti, presenti a tratti a margine delle valli alluvionali), sono rilevabili orizzonti appartenenti al Subsintema di Villa Verucchio (AES7) ed al Subsintema di Bazzano (AES6).

L'insieme dei depositi ghiaiosi e sabbiosi di canale fluviale, affioranti e sepolti lungo la valle del F. Marecchia, a ridosso dello sbocco vallivo e nella pianura antistante, costituisce un serbatoio idrico di

notevole importanza, ampiamente sfruttato sia per fini pubblici (idropotabili), che privati (agricoli, industriali, zootecnici).

La conoide del F. Marecchia è infatti costituita da una zona apicale in cui le ghiaie sono amalgamate tra loro e formano un acquifero freatico monostrato compreso tra la superficie topografica ed il substrato marino prevalentemente argilloso. La zona di amalgamazione delle ghiaie è quella in cui si verifica la ricarica diretta di tutta la conoide, sia dalle infiltrazioni efficaci, sia dall'alveo.

A valle della zona di amalgamazione i diversi lobi di conoide si separano e tra essi si interpongono dei depositi fini di spessore crescente procedendo verso mare. I diversi acquiferi sono quindi disconnessi dalla superficie e acquisiscono tutti condizioni di artesianità. I principali acquiferi, ovvero quelli più spessi ed arealmente più continui, corrispondono alle porzioni regressive terminali dei cicli deposizionali riconosciuti nel sottosuolo, caratterizzate per l'appunto dallo sviluppo di estesi lobi di conoide alluvionale.

Gli acquitardi più estesi corrispondono invece alla argille e limi presenti nella parte inferiore di ciascuna unità idrostratigrafica di sottosuolo. Le Unità Idrostratigrafiche presenti in sito sono infatti formate da più sequenze deposizionali caratterizzate da alternanze cicliche di depositi fini, o aquitardi (presenti alla base) e grossolani (al tetto) molto spessi sede degli acquiferi. Una sequenza deposizionale è una successione di sedimenti geneticamente legati tra loro (sono deposti durante lo stesso intervallo di tempo e con meccanismi della sedimentazione legati tra loro), compresi alla base e al tetto da superfici di discontinuità della sedimentazione e da superfici di continuità ad esse correlate.

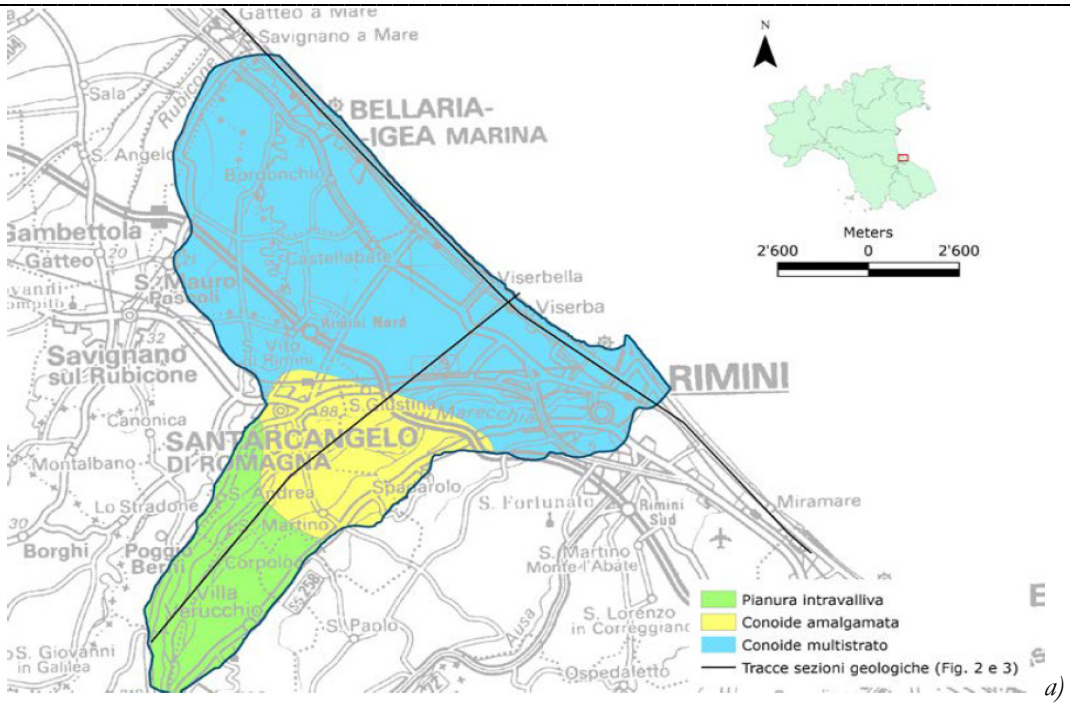
All'interno di ciascun "Gruppo Acquifero", partendo dalla superficie, vengono distinti diversi Complessi Acquiferi" gerarchicamente inferiori (a cui comunque corrisponde un'unità stratigrafica della Carta Geologica) identificate dal nome del Gruppo Acquifero di appartenenza, seguito da un numero progressivo (A0, A1 ecc.).

Per quanto riguarda la corrispondenza tra le unità geologiche, a cui i diversi corpi ghiaioso-sabbiosi sono attribuiti e quelle idrostratigrafiche, si fa riferimento alla sottostante Tabella 4.1 (tratta da Severi et al., 2014).

| | | | |
|---|---|---|---|
| AES | AES8 | GRUPPO ACQUIFERO A | COMPLESSO ACQUIFERO A0 |
| | AES7 | | COMPLESSO ACQUIFERO A1 |
| | AES6 | | COMPLESSO ACQUIFERO A2 |
| | AES indistinto | | COMPLESSO ACQUIFERO A3+A4 |
| AEI | | GRUPPO ACQUIFERO B | |
| IMO | | GRUPPO ACQUIFERO C | |

*Tabella 4.1 – Corrispondenza tra Unità Geologiche e Unità Idrostratigrafiche*

Inoltre la conoide alluvionale, in funzione dell'assetto e interconnessione dei livelli ghiaiosi e del rapporto con le zone di alimentazione entro il bacino di ricarica, viene distinta in tre zone principali denominate da monte verso valle rispettivamente come: pianura intravalliva, conoide amalgamata e conoide multistrato (vedi figura 4.8 a e b).



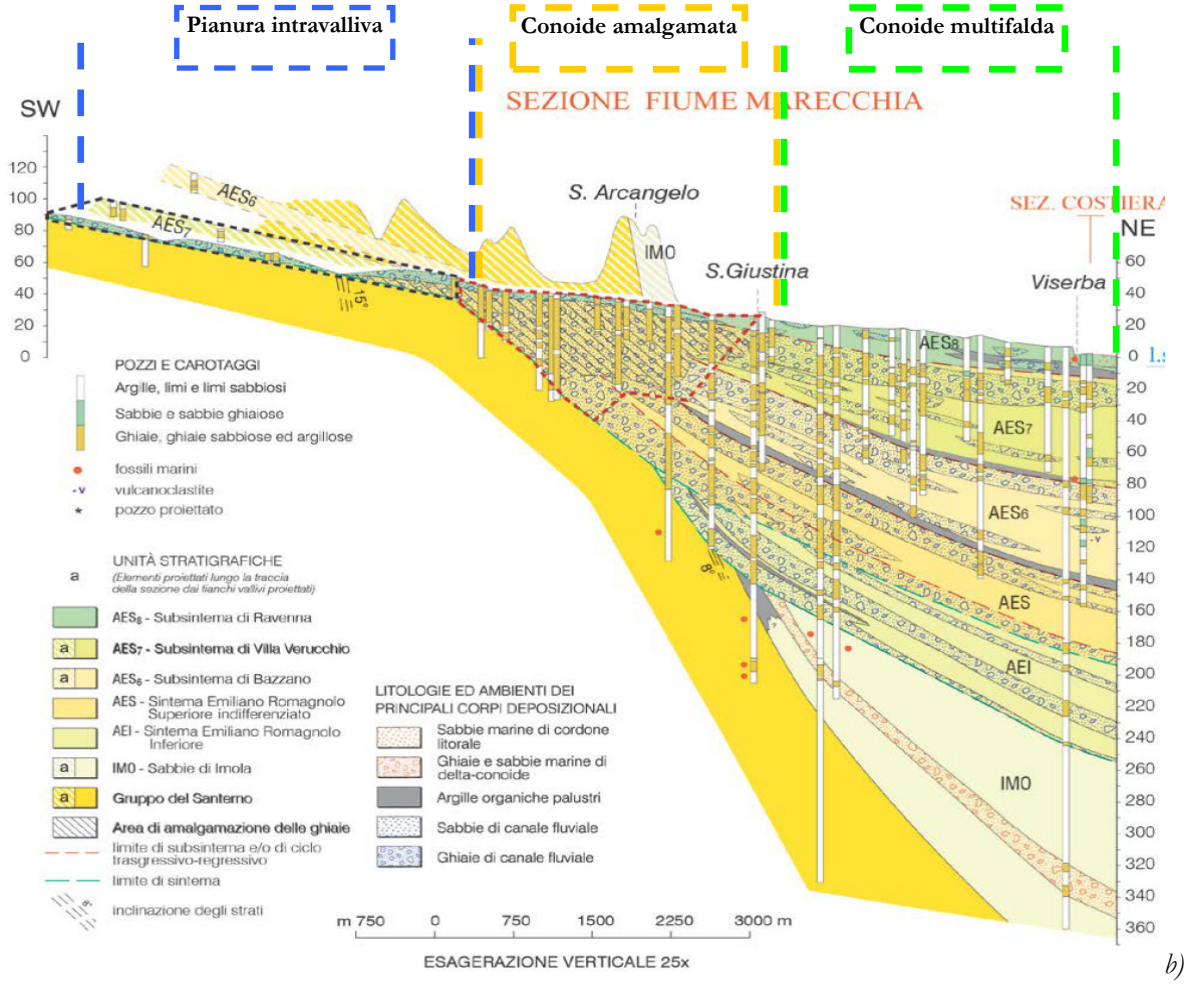




*Figura 4.8 – Ambiti della conoide del Marecchia (a); sezione geologica rappresentativa della conoide del Marecchia perpendicolare alla costa e passante per il tratto costiero di Rimini Nord (b).*

Il conoide del Fiume Marecchia ha una forma vagamente ellittica con inflessione verso la destra idrografica ed ha uno spessore dei materiali alluvionali che varia da circa 2 mt all'altezza dell'apice a Ponte Verucchio, ad oltre 300 mt nella zona più distale di Bellaria. La diffusione dei materiali psefitici e psammitici costituiti da ghiaie e sabbie grossolane, consente talora una comunicazione tra i livelli più superficiali della falda acquifera. La falda acquifera assume caratteri di spiccata freaticità per i primi metri superficiali e, quindi, maggiore semiartesianità/artesianità in profondità, a causa dei primi consistenti strati di materiali a granulometria fine con notevole impermeabilità e continuità.

L'alternanza poi di livelli a diversa permeabilità determina condizioni di artesianità a varia profondità in relazione con le altre falde acquifere profonde, che appaiono generalmente non comunicanti per la discontinuità dei vari corpi idrogeologici grossolani ed essendo questi isolati da potenti strati di depositi fini che li avvolgono, quasi sempre completamente, preservandoli anche dal punto di vista batteriologico e parzialmente dal punto di vista chimico.

L'alimentazione di queste falde distribuite nell'area della conoide sembra avvenire prevalentemente ad opera di acque fluenti lungo il corso del Fiume Marecchia e di superficie a valle della stretta di Ponte Verucchio e subordinatamente ad opera di numerose sorgenti, a volte confluenti in corsi d'acqua laterali al corso d'acqua principale, disposte secondo l'asse Villa Verucchio - Poggio Berni - Santarcangelo di Romagna e relative a falde acquifere inserite nella sabbie e limi del Pliocene superiore e nei conglomerati regressivi plio-pleistocenici. Seguono poi nell'ordine altri fattori quali le precipitazioni meteoriche almeno per la falda più superficiale ed altri ancora scarsamente influenti.

I caratteri deposizionali, nell'area di interesse e negli orizzonti più superficiali, vengono condizionati dall'assetto dei corsi d'acqua del reticolo minore ed in particolare dal T. Uso, il cui bacino idrografico, di minor estensione, è attestato sulle ultime pendici collinari, in presenza di formazioni argillose e argilloso sabbiose.

Il prisma deposizionale, costituito da depositi quaternari continentali si è sviluppato coerentemente alle limitrofe conoidi e presenta un rapido approfondimento del substrato geologico, con contestuale accrescimento delle sequenze deposizionali (sintemi e sub-sintemi), le quali divengono via via più spesse allontanandosi dal piede delle colline in direzione NE (verso la costa) ed in cui risulta prevalente una matrice fine di tali depositi.

Le unità di fatto cartografate, quindi, corrispondono a pacchi di sedimenti delimitati da superfici-tempo e, per questo, coincidono con unità stratigrafico-deposizionali, di cui le sequenze deposizionali costituiscono un estremo. I subsintemi sono stati inoltre caratterizzati dal punto di vista litologico e paleoambientale; la rappresentazione dei caratteri di facies dei principali corpi sedimentari riconosciuti attraverso l'impiego dei più comuni criteri litostratigrafici, è stata in questo modo sviluppata all'interno di unità inquadrate dal punto di vista cronostratigrafico.

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti al margine appenninico padano ed i sedimenti ad essi correlati nel

sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi includono depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in cicli deposizionali di vario ordine gerarchico. In affioramento, al margine appenninico padano, il Supersintema Emiliano-Romagnolo coincide con il ciclo Qc di Ricci Lucchi et alii (1982) e presenta un limite inferiore inconforme, evidenziato da una discordanza angolare sui depositi litorali delle Sabbie di Imola o su quelli marini riferibili al Gruppo del Santerno. Nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola, il Supersintema Emiliano-Romagnolo appoggia generalmente in discordanza angolare su depositi correlati alle Sabbie di Imola. Il limite superiore coincide col piano topografico. All'interno di questa unità, una superficie di discordanza angolare di pochi gradi che separa depositi prevalentemente limosi e sabbiosi di piana alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore, AEI) da sovrastanti ghiaie di conoide o terrazzo alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, AES).

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore costituisce la parte più antica del Supersintema Emiliano-Romagnolo. Sono stati tentativamente attribuiti a questa unità alcuni affioramenti di depositi alluvionali ghiaiosi molto grossolani del margine appenninico immediatamente a monte di Savignano sul Rubicone.

Il contatto inferiore è erosivo e discordante su SVG ed è caratterizzato da una grossa lacuna erosiva, testimoniata dalla mancanza di depositi litorali e marino marginali riferibili ad IMO e SVGa. Secondo questa interpretazione i depositi di AEI devono essere riferiti ad un contesto paleogeografico molto diverso dall'attuale in cui (a) la valle del F. Marecchia era meno incisa ed il fiume poteva raggiungere quest'area, (b) il fronte appenninico era più arretrato e (c) i torrenti Uso e Rubicone avevano bacini molto più piccoli di oggi o erano del tutto assenti. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo e comprende la gran parte dei depositi continentali sia affioranti che sepolti presenti nel Foglio 256 e 255 del progetto CARG.

In affioramento locale AES è costituito da ghiaie e sabbie di canale fluviale e da alternanze argilloso-limoso-sabbiose di tracimazione fluviale. Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale. Nel sottosuolo della pianura più distale (settore di nord est e Foglio 240) il limite inferiore è interpretato come un contatto erosivo e discordante sui depositi di conoide e di piana alluvionale di AEI. Il limite superiore corrisponde all'attuale superficie topografica. In affioramento AES è stato suddiviso in 5 subsintemi (vedi figura 4.5). Nei settori intravallivi ogni subsintema è costituito da depositi alluvionali di un singolo terrazzo o di un gruppo di terrazzi separati da quelli immediatamente sopra e sottostanti da scarpate di erosione particolarmente ampie, che delimitano depositi geometricamente discordanti tra loro. La superficie sommitale affiorante dei diversi subsintemi (cioè dei diversi gruppi di terrazzo) è caratterizzata da uno specifico grado di alterazione dei suoli, le cui differenze sono generalmente meglio evidenti fra i subsintemi più recenti. I depositi dei 5 subsintemi individuati nelle porzioni intravallive si immergono rapidamente verso nord est nel sottosuolo della pianura.

I tre cicli più superficiali del sottosuolo (corrispondenti quindi ad AES6, AES7 e AES8) sono quelli meglio definiti dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano e sono costituiti da una porzione basale caratterizzata dalla frequente presenza di argille ricche in sostanza organica di piana alluvionale e palude che

poggiano con un contatto molto spesso brusco sulle ghiaie e sulle sabbie fluviali che costituiscono il tetto del ciclo sottostante. Questi depositi fini, spesso organici, passano sottocorrente, nel sottosuolo a ridosso dell'attuale linea di costa (Fogli 240 e 241), a depositi lagunari e marini. Il limite inferiore di ognuno di questi cicli, così come è stato definito e correlato con il settore costiero, rappresenta quindi una superficie di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana coincidente con una superficie trasgressiva. Essa ha una espressione fisica molto evidente ed è pertanto ben riconoscibile nel sottosuolo come un forte contrasto di facies.

L'età della base dell'intero sintema è attribuita per posizione stratigrafica, al Pleistocene medio (350-450.000 anni secondo Regione Emilia Romagna & Eni-Agip, 1998). I depositi del tetto dell'unità sono attualmente in evoluzione e pertanto la loro età è olocenica (vedi fig. 4.11 e sezioni geologiche profonde allegate).

Di seguito si fornisce una descrizione dettagliata delle formazioni geologiche presenti in sezione e affioranti nei territori studiati, tratta dal Catalogo dei Dati Geografici del Servizio Geologico e Sismico della Regione Emilia Romagna.

## DEPOSITI QUATERNARI CONTINENTALI

**b1 Alluvioni attuali**
Depositi dei fondovalle attuali, eterometrici (dalle ghiaie alle argille), che costituiscono le forme di letto dei fiumi e che vengono rimaneggiati durante gli eventi alluvionali principali.

## SINTEMA EMILIANO - ROMAGNOLO - SUPERIORE (AES).

Sabbie e ghiaie con subordinati limi argillosi costituenti terrazzi intravallivi e conoidi, talora con indizi di pedogenesi, e i depositi attualmente in evoluzione nei fondovalle.

Sintema parzialmente suddiviso in subsintemi limitati, in affioramento, dalle principali scarpate di terrazzo fluviale e paleosuoli e, nel sottosuolo della pianura, da bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino-marginali e palustri su depositi di conoide e di piana alluvionale. Contatto inferiore erosivo e discordante sui vari terreni prequaternari.

*Pleistocene superiore-Olocene*

**AES8 - Subsintema di Ravenna.**

Ghiaie da molto grossolane a fini con matrice sabbiosa, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi, limi e limi sabbiosi, rispettivamente depositi di conoide ghiaiosa, intravallivi terrazzati e di interconoide. Argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di tracimazione fluviale (piana inondabile, argine, e tracimazioni indifferenziate). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico. A tetto suoli, variabili da non calcarei a calcarei, a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente meno di 150 cm, e a luoghi parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallobruno.I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unita' AES8a.nel sottosuolo della pianura: depositi argillosi e limosi grigi e grigio scuri, arricchiti in sostanza organica, di piana inondabile non drenata, palude e laguna passanti, verso l'alto, a limi-sabbiosi, limi ed argille bruni e giallastri di piana alluvionale ben drenata con suoli calcarei e non calcarei al tetto; depositi deltizi, litorali e,

localmente, marini. I depositi di piana alluvionale includono ghiaie di canale fluviale e geometria nastriforme; lungo la fascia costiera passano con contatto netto ed erosivo a sabbie litorali.Il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsintemi e sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità circa 28 metri.

*Pleistocene superiore-Olocene*

**AES8a - Unità di Modena.**

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoide e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (meno di 100 cm). Può ricoprire resti archeologici di età romana del VI secolo d.C Limite inferiore inconforme, marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonatato a parzialmente carbonatato contenente resti archeologici di età dal Neolitico al Romano..

*Olocene*

**Subsintema di Villa Verucchio (AES7)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Limite inferiore dato, in affioramento, da una superficie di erosione fluviale che incide AES6 ed i depositi marini preesistenti.

*Pleistocene medio-superiore*

**Subsintema di Bazzano (AES6)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale che incide, in discordanza, i depositi marini preesistenti.

*Pleistocene medio;*

## SUCCESSIONE NEOGENICO-QUATERNARIA DEL MARGINE PADANO

**SABBIE DI IMOLA (IMO)**

Arenarie e sabbie da medie a finissime, generalmente poco cementate, in strati spessi e molto spessi, mal definiti, frequentemente amalgamati fra loro, con livelli di ghiaia contenente abbondanti ciottoli silicei. Stratificazione incrociata ad alto e basso angolo, piano-parallela e con strutture tipo hummocky. Sono presenti rare intercalazioni, centimetriche e decimetriche, di peliti, talora fortemente bioturbate, con locali laminazioni ondulate tipo ripples da onda.

Nella parte alta, sono localmente presenti intercalazioni conglomeratiche a matrice sabbiosa (IMOa) con ciottoli derivanti da unità liguridi e dalla successione epiligure.

Potenza massima affiorante circa 60 metri, superiore ai 150 m nel sottosuolo.

Limite inferiore discordante su SVG e SVGa. Limite superiore erosivo discordante con AEI e AES.

Depositi di ambiente litorale.

*Pleistocene medio (0,8-0,65 MA)*

**ARENARIE E ARGILLE DI SAVIGNANO (SVG)**

Alternanza di strati sottili e molto sottili, raramente medi, di argille grigie chiare, beige all'alterazione, e arenarie fini e finissime, poco cementate, talora lenticolari, A/P da <<1 crescente verso l'alto e lateralmente; verso SW l'aumento delle arenarie è tale da permettere la distinzione di una litofacies sabbiosa (SVGa). Potenza massima affiorante circa 200 metri.

Limite inferiore graduale su AAS per aumento della frazione pelitica. Limite superiore graduale, parzialmente eteropico, con SVGa e discordante con IMO.

Depositi di piattaforma.

*Pleistocene inferiore*

**Litofacies della Grotta Rossa (SVGa)**

Arenarie medie e fini, mal cernite, in strati spessi e molto spessi frequentemente amalgamati, con tritume conchigliare associato a laminazione ondulata. Sono presenti intercalazioni metriche e decimetriche di peliti grigio-azzurre contenenti faune marino-marginali.

Potenza estremamente variabile, fino ad una massimo di circa 100 metri.

Limite inferiore graduale rapido, parzialmente eteropico, con SVG. Limite superiore discordante con IMO.

*Pleistocene inferiore*

**FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE (FAA)**

Argille di colore grigio-azzurro con rare intercalazioni di arenarie giallastre in letti da sottili a spessi, e argille marnose e siltose grigie in letti sottili e molto sottili.

Sono fossilifere ricche in foraminiferi e macrofossili, spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata. Sono talora diffusi slumps con olistoliti di gesso derivati da unità evaporitiche. Limite inferiore netto, probabilmente discontinuo, su FAA2; paraconcordante su FCO. Depositi di scarpata e base scarpata. Potenza complessiva affiorante di circa 700 m.

*Piacenziano-Gelasiano*

**Membro arenaceo di Borello (FAA2).**

Membro interamente suddiviso in litofacies caratterizzate da variabilità del rapporto A/P e spessore medio degli strati, che si ripetono a più altezze stratigrafi che e mostrano rapporti di eteropia. Passaggio rapido a FAA. Spessore estremamente variabile, raggiunge i 1000 m e localmente si riduce fi no ad annullarsi.

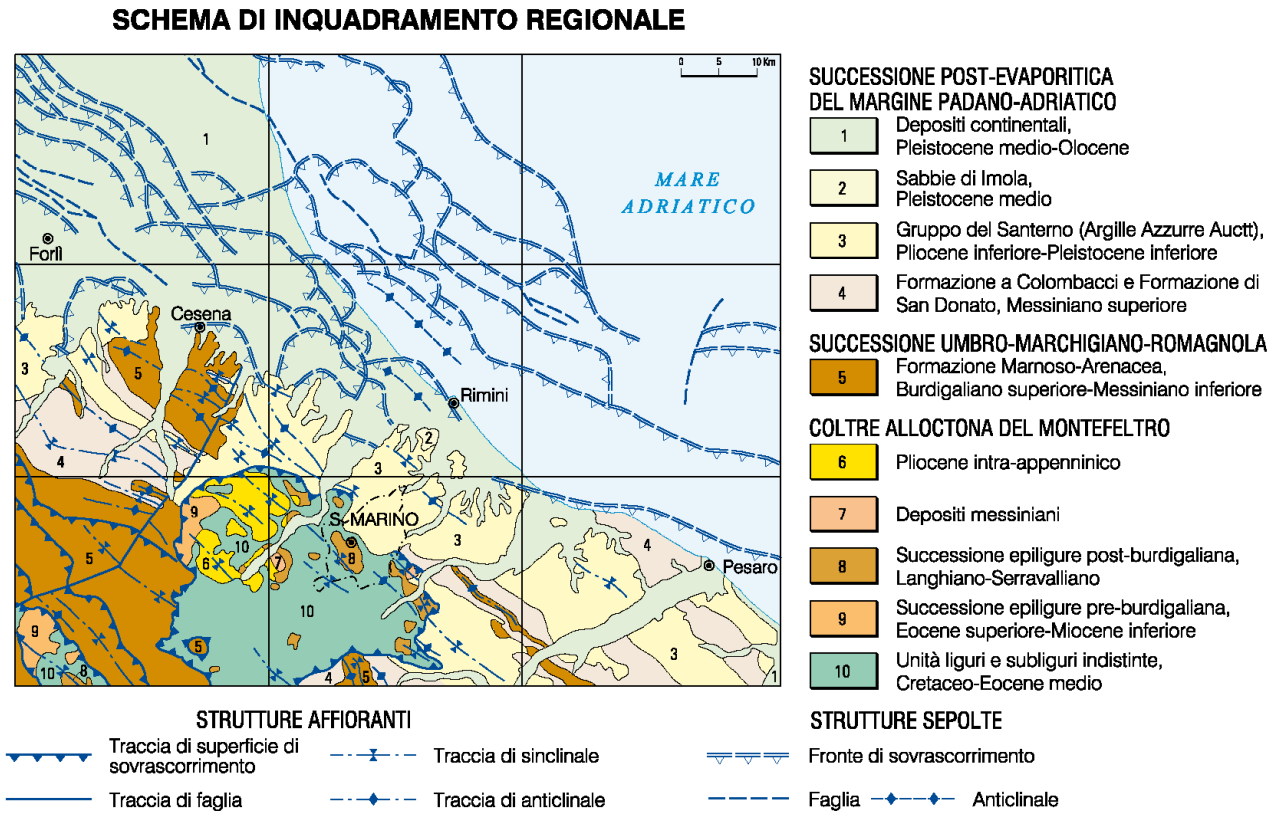
*Pliocene inferiore*

**FAA2pa - litofacies pelitico-arenacea.**

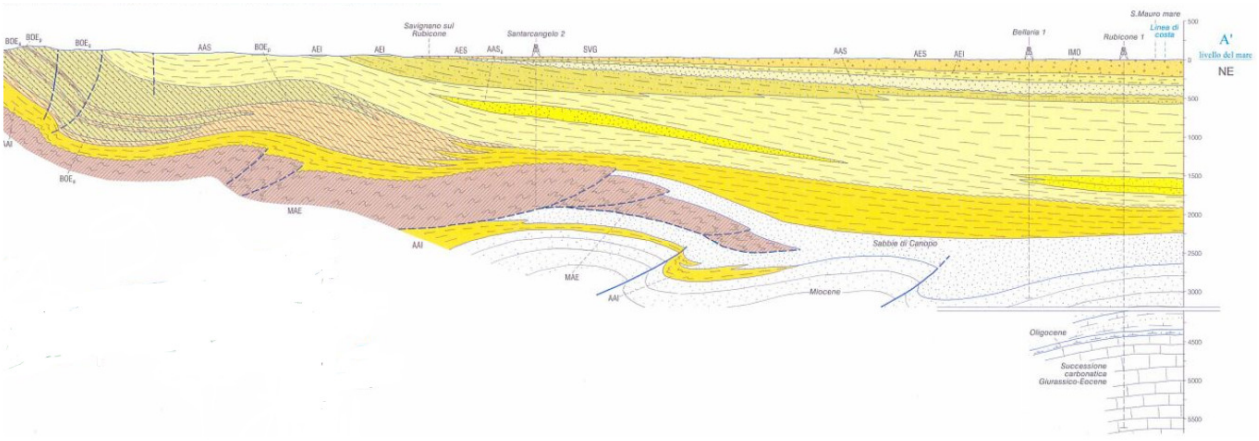
Alternanza tra argille e argille sabbiose grigio azzurre, ricche in foraminiferi e macrofossili (Lamellibranchi, Scafopodi, radioli di Echinidi etc. ), spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata, con alterazione biancastra e con veli e laminazioni sabbiose; rari gli strati di sabbie, grigio giallastre gialle generalmente molto sottili. Rapporto A/P generalmente < 1/2..

**FAA2ap - Litofacies arenaceo-pelitica**
Alternanze di argille sabbiose grige, localmente marnose, fortemente fossilifere, biancastre all'alterazione, e arenarie silicoclastiche grigio-giallastre in livelli sottili e medi, poco cementate, con A/P variabile da 1/2 a 2; talora arenarie prevalenti in strati da spessi a molto spessi, mal definiti, a laminazione inclinata e con livelli di tritume conchigliare; sono presenti livelli siltosi; le arenarie, solitamente poco cementate presentano nuclei a maggiore cementazione (cogoli).

Di seguito si riporta altresì una sintesi grafica degli assetti geologico-strutturali e dell'assetto cronostratigrafico del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), rappresentativi per la definizione del contesto geologico delle aree in studio (fig. 4.9-4.10-4.11). Le sezioni geologiche rappresentative vengono riportate in Allegato 2 alla presente relazione, mentre la relativa traccia viene individuata planimetricamente nella Carta Geologico-Tecnica.




a)




b)

*Figura 4.9 – Schema di inqudramento generale – progetto CARG (Foglio 256 Rimini) a); Stralcio di sezione geologica A-A' tratto Montalbano - Savignano sul R. - S. Mauro a mare – progetto CARG (Foglio 256 Rimini) b).*

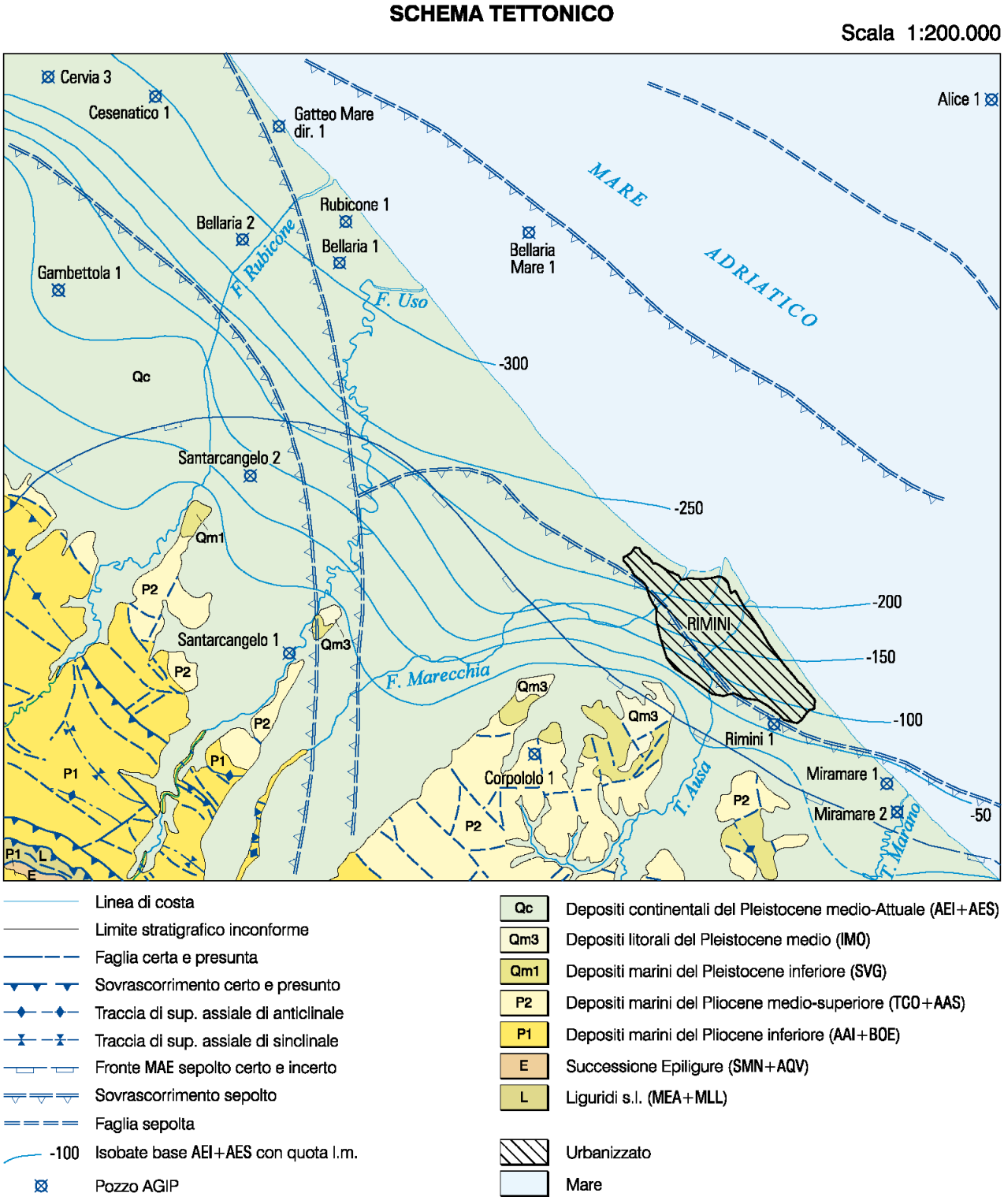
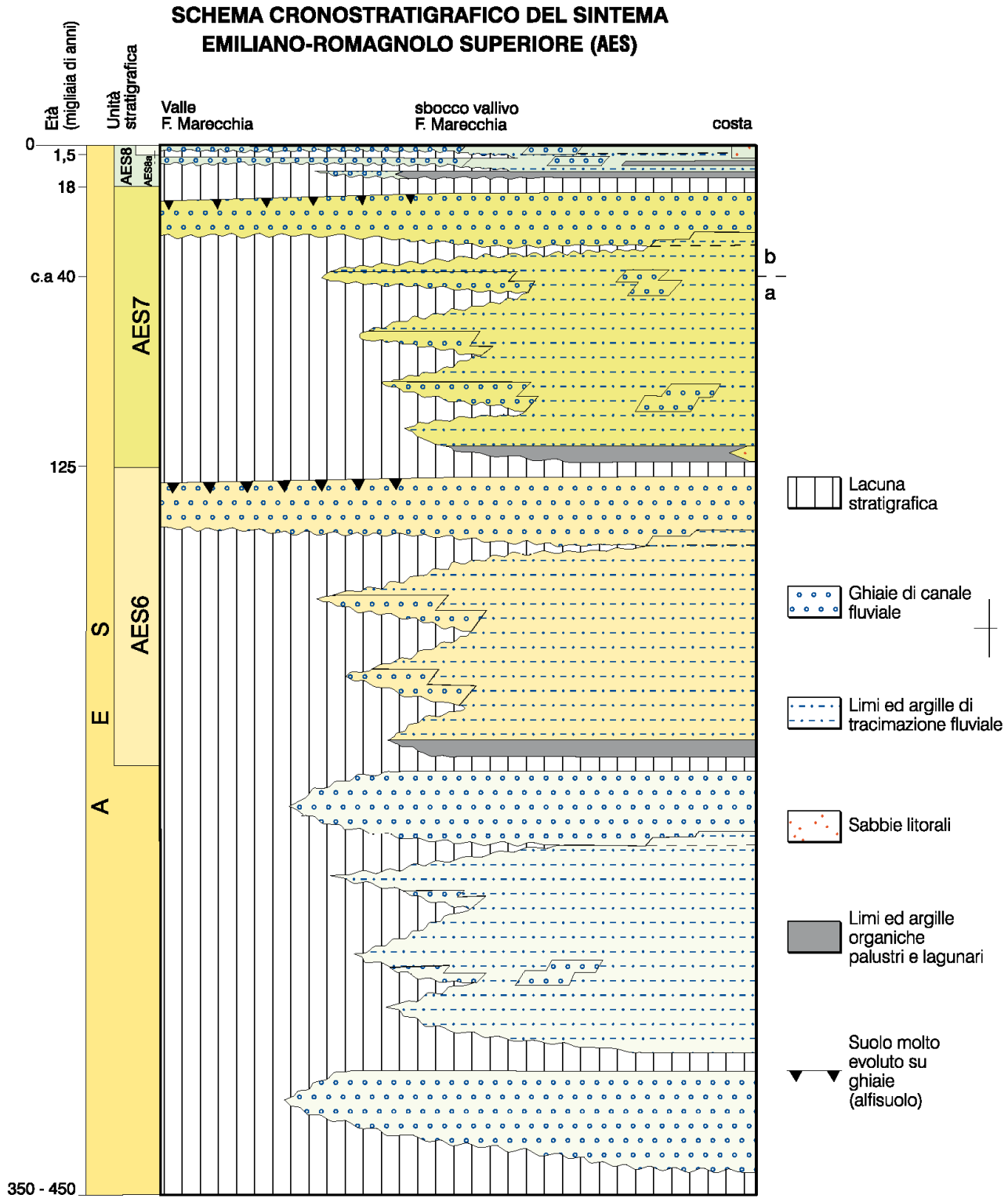
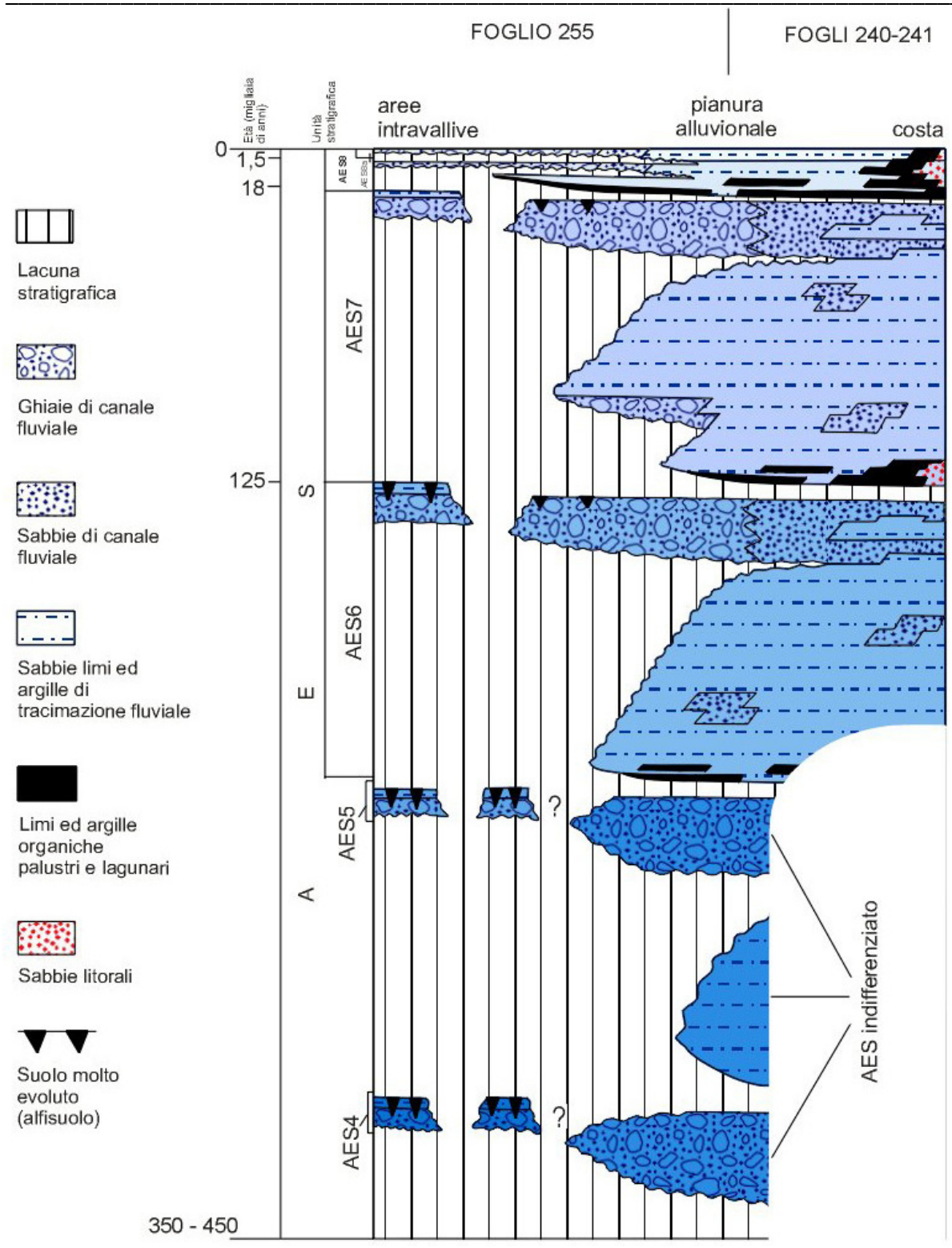



*Figura 4.10 – Schema tettonico generale – progetto CARG (Foglio 256 Rimini)*


SCHEMA CRONOSTRATIGRAFICO DEL SINTEMA
EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE (AES)
Età (migliaia di anni)
Unità stratigrafica
Valle F. Marecchia
sbocco vallivo F. Marecchia
costa
0
1,5
18
c.a 40
125
350 - 450
AES8
AES8a
AES7
AES6
A E S
b
a
Lacuna stratigrafica
Ghiaie di canale fluviale
Limi ed argille di tracimazione fluviale
Sabbie litorali
Limi ed argille organiche palustri e lagunari
Suolo molto evoluto su ghiaie (alfisuolo)

*a)*




*b)*

*Figura 4.11 – Schema cronostratigrafico del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), Foglio 256 Rimini e Foglio 255 Cesena - CARG*

## 5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Le indagini realizzate ex novo, associate a quelle del precedente studio di Microzonazione Sismica, degli strumenti urbanistici ed a quelle realizzate da privati e dalla Regione Emilia Romagna, hanno permesso di delineare una quadro conoscitivo indispensabile per l'adeguamento del I-II Livello ed gli approfondimenti di III livello della Microzonazione Sismica. Anche in occasione del presente studio sono state condotte ulteriori prove geognostico-geofisiche ad integrazione del quadro conoscitivo e delle esigenze dell'amministrazione.

In dettaglio, si tratta di complessive N. 89 prove selezionate e rappresentative di più ampio database e per l'assetto territoriale, di cui N. 53 di tipo geotecnico e N. 36 di tipo geofisico, per un totale di N. 83 prove puntuali e n. 6 in array lineare distribuite sul territorio in studio (fig. 5.1).

| IND. GEOGNOSTICHE | |
|---|---|
| TIPO | NUMERO |
| CPTE | 33 |
| CPT | 9 |
| S | 11 |
| TOTALE | 53 |

| IND. GEOFIS./DINAM. | |
|---|---|
| TIPO | NUMERO |
| MASW | 12 |
| HVSR | 24 |
| ESAC/SPAC | 3 |
| SCPT | 3 |
| DH | 3 |
| TOTALE | 36 |

Quindi, ad integrazione del database di archivio, nelle aree ritenute rappresentative per l'assetto territoriale, sono stati realizzati ex novo: n. 9 prove CPTe , n. 6 prove HVSR, n. 3 prove ESAC/SPAC e 4 prove di laboratorio.

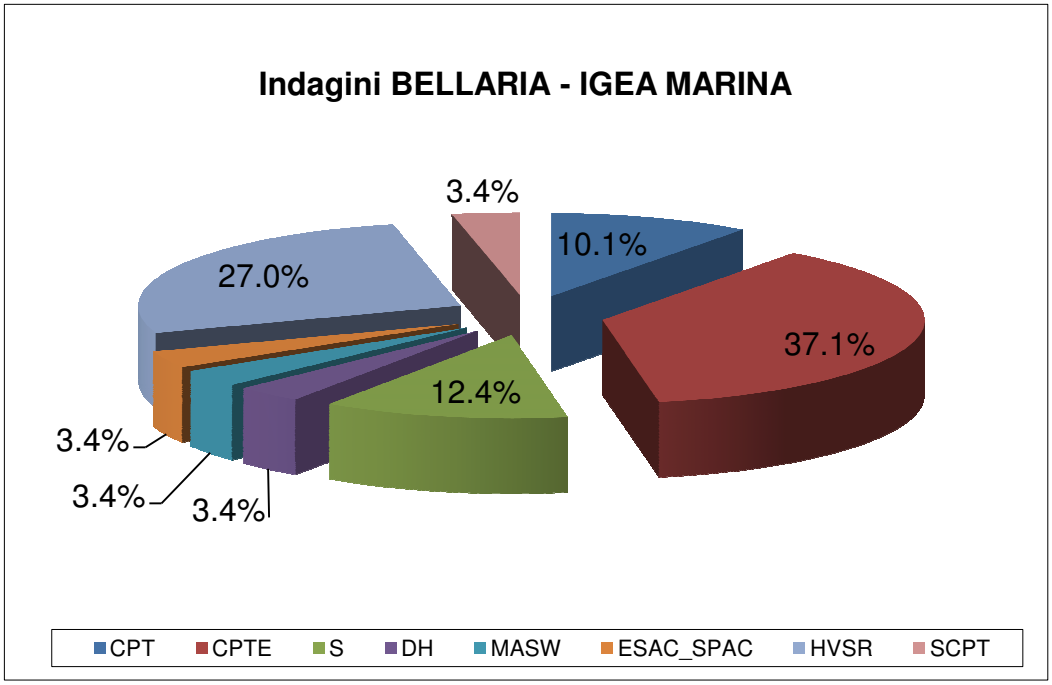



*Figura 5.1 – Totale indagini geognostiche e geofisiche rappresentative sul territorio del comune di Gambettola ed utilizzate per lo studio di MS.*

Tutte le tipologie di prospezioni sia integrative che pregresse sono state classificate e archiviate all'interno di un sistema informativo territoriale (G.I.S.) come previsto dagli standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.2.
(http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard_studi_ms.wp).

Nella "Carta delle Indagini", in allegato alla relazione, è possibile visualizzare l'ubicazione delle differenti indagini in sito; i risultati di ciascuna prova e le modalità di esecuzione sono riportate, a mezzo di semplici "report", nel data-base associato alla mappa.

### *5.1. Indagini di tipo geofisico*

L'analisi dei fenomeni di amplificazione locale coincide con lo studio degli effetti di risonanza legati alle onde trasversali o di taglio. Per tale ragione, quantificare l'andamento delle velocità di propagazione di questa tipologia di onde nel primo sottosuolo (profilo Vs) rappresenta un'informazione essenziale ai fini della caratterizzazione meccanica (in campo dinamico) dei terreni. Stime del profilo Vs vengono realizzate in attraverso l'analisi di appropriate prospezioni di tipo geofisico condotte, in base alle condizioni logistiche e alle profondità da esplorare, con differenti modalità esecutive:

**Indagini sismiche di tipo diretto**: Come dice il nome stesso questa tipologia di prospezioni ha il non trascurabile vantaggio di fornire una stima "diretta" delle velocità delle onde S. La tecnica d'indagine consiste nel generare, attraverso una sorgente artificiale (colpo di martello o piccoli esplosivi) un treno d'onde nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo della perturbazione in corrispondenza di una serie di sensori (geofoni) posti sulla superficie del terreno (indagine di sismica a rifrazione) o all'interno di un foro di perforazione appositamente attrezzato (indagine down-hole e con cono sismico). I principali svantaggi di tali metodologie risiedono, sia nell'esiguo volume di sottosuolo esplorato, sia nei costi d'indagine relativamente alti. Tuttavia tali tecniche risultano essere quelle a maggiore accuratezza e ripetitibilità.

**Indagini sismiche di tipo indiretto**: Sono metodologie basate sull'analisi delle proprietà dispersive delle onde Superficiali (onde di Rayleigh) nei mezzi stratificati. Lo scopo di questa tipologia di prospezioni è risalire ad una funzione caratteristica del terreno (curva di dispersione) univocamente correlata alla struttura meccanico-stratigrafica del sito. Considerando che le onde Superficiali sono essenzialmente un prodotto delle onde di Volume e in particolar modo delle onde trasversali (S) è possibile, a partire dalla curva di dispersione, risalire in maniera indiretta al profilo di velocità Vs attraverso opportune procedure numeriche di inversione dati.

Le indagini di tipo indiretto vengono spesso diversificate, in base alla sorgente energizzante utilizzata per sollecitare i sensori, in "attive" e "passive":

Indirette Attive: Come le più comuni tecniche dirette, sfruttano sorgenti di tipo artificiale (colpo di martello) e una distribuzione lineare dei sensori sul terreno (MASW). Il principale vantaggio di questa tipologia di acquisizione consiste, oltre alla velocità ed al basso costo della prova, nell'ottima risoluzione che si ottiene nel caratterizzare gli strati di terreno maggiormente superficiali.

Indirette Passive: Utilizzano come fonte di energia la continua vibrazione del terreno, sia di origine antropica sia naturale, definita Rumore Sismico Ambientale o semplicemente Vibrazione Ambientale. I rilievi di tipo passivo sono generalmente realizzati attraverso distribuzioni bidimensionali dei sensori e raggiungono profondità di esplorazione dell'ordine delle centinaia di metri. Il principale svantaggio di questa tipologia di prova consiste in una scarsa risoluzione per gli strati più superficiali e in un ambiguità interpretativa, spesso, non trascurabile. Tuttavia, tali indagini, se associate ad una conoscenza preliminare delle condizioni del sito che ne "guidi" l'interpretazione, risultano essere strumenti conoscitivi molto potenti. La sismica passiva può essere applicata su stendimenti monodimensionali che prevedono l'utilizzo congiunto di più sensori (elaborazione Re.Mi. – refraction microtremors - Louie, 2001) oppure stendimenti bidimensionali a interspaziatura geofonica anche variabile, a formare una vera e propria antenna sismica di significative dimensioni, elaborandone i dati registrati con tecnica ESAC per la computazione della curva di dispersione legata alle onde di Rayleigh (Ohori et al, 2002). L'indagine passiva può inoltre essere realizzata attraverso un'unica stazione di misura. Questa ultima tecnica, conosciuta come metodologia HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), differentemente da ogni altra prospezione di tipo indiretto non ha lo scopo di ricavare le proprietà dispersive dei materiali bensì le modalità di vibrazione del terreno (Nakamura 1983-2008). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare, infatti, le principali frequenze di vibrazione del suolo (fra cui la più importante "f0", detta frequenza fondamentale) e sfruttarle per scopi stratigrafici. Tale tecnica consente di effettuare altresì interpretazioni congiunte con altri metodi geofisici e la conoscenza di vincoli stratigrafici per la definizione di profili profondi di Vs. Inoltre è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli sintetici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali, basato sulla propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori.

Dall'analisi congiunta di prove sismiche attive in media alta risoluzione, sulla scorta delle conoscenze stratigrafiche locali da prove geognostiche in sito, sono stati stimati i valori di VsH (i profili associati alle misure sono visualizzabili nei report associati al DB della Microzonazione Sismica) utilizzati sia per le carte di MS mediante approccio semplificato tabellare che per lo sviluppo dei modelli di risposta sismica locale a supporto delle analisi di Livello 3.

### *5.2. Indagini di tipo geognostico/geotecnico*

Le indagini geognostiche utilizzate per lo studio, sia di nuova realizzazione che di archivio, sono costituite da sondaggi meccanici a carotaggio continuo, prove CPT con punta meccanica, elettrica e talora piezocono e, all'occorrenza, stratigrafie di sondaggi a carotaggio continuo o pozzi per lo sfruttamento delle acque di falda.
I sondaggi meccanici (indagini geognostiche di tipo diretto) hanno consentito di valutare l'effettivo assetto stratigrafico dei terreni sino alle profondità raggiunte e, talora, il prelievo di campioni e relative analisi di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica nonché dei parametri di resistenza meccanica e deformabilità. Tale metodologia consente di attraversare gli orizzonti competenti e ghiaiosi spesso presenti nel primo sottosuolo alluvionale.
Al proposito anche le stratigrafie dei pozzi per acqua hanno consentito di superare gli orizzonti ghiaiosi raggiungendo talora profondità elevate.
Le prove penetrometriche (indagini geognostiche di tipo indiretto) risultano spinte a profondità variabile, a volte anche sino a rifiuto in orizzonti grossolani particolarmente consistenti, consentendo di desumere i caratteri stratigrafici e di resistenza meccanica alla penetrazione.
La caratterizzazione geomeccanica delle coperture ed i relativi spessori risultano di estrema importanza anche per l'elaborazione ed interpretazione delle prove geofisiche limitrofe.
Tra le indagini geotecniche sono riportate anche prove di laboratorio in colonna risonante, di particolare interesse comprendere il comportamento dinamico dei terreni nel campo delle basse medie deformazioni.
La campagna geognostica realizzata "ex-novo" e le numerose informazioni pregresse hanno quindi permesso di definire un chiaro quadro litostratigrafico e geomeccanico delle aree in esame (l'ubicazione di ciascuna prova è visualizzabile nella Carta delle Indagini ed i risultati di ciascuna prova sono riportati nell'apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dei dati.).

## 6. MODELLO DI SOTTOSUOLO

### *6.1. Andamento delle Vs nel sottosuolo*

Come evidenziato nell'inquadramento geologico (Capitolo 4) le profondità del substrato geologico attese per l'area di studio di alcune centinaia di metri nelle zone più profonde della conoide deposizionale. Data la quantità di informazioni geofisiche distribuite sul territorio si sono sfruttate le prove HVSR congiuntamente ai dati geognostici profondi per individuare i picchi di frequenza di maggior rilevanza per la risposta sismica locale, tra cui quelli associabili ad interfacce compatibili con un bedrock geofisico. Invece per caratterizzare i depositi di copertura in termini di valori di velocità delle onde di taglio (profili Vs), per gli scopi dello studio, si è potuto fare riferimento sia a prove di sismica attiva in foro (a cui si è riconosciuto maggior peso e coerenza) che a indagini sismiche indirette attive (tipo MASW), passive in Array (tipo ESAC) o stazione singola (HVSR) soprattutto se effettuate con sensori a bassa frequenza.

A supporto dello studio di I e II Livello, con approccio semplificato, si è data priorità, ove possibile (es. in assenza di orizzonti ghiaiosi superficiali), alle misure effettuate in foro ed in array per la definizione dei profili di velocità e la stima di Vseq sino alle profondità richieste dai modelli di riferimento per la stima dei fattori di amplificazione; tuttavia ove assenti si è fatto riferimento ai valori stimati tramite inversione delle curve H/V. Data comunque la presenza di coperture di elevato spessore, le tabelle utilizzate hanno previsto l'utilizzo di valori di velocità equivalente sino a 30 mt di profondità (VS30). I risultati ottenuti per i siti in studio sono visualizzabili nei report associati alla Carta delle Vs e delle Indagini (Data-Base-Microzonazione Sismica).

Per lo sviluppo dei modelli di sottosuolo utili alle analisi di RSL, si è data priorità alle prove sismiche in foro eseguite in prossimità di prove in Array bidimensionale (ESAC/SPAC) ed HVSR (con sensore a frequenza propria pari a 2Hz), al fine di elaborare profili di Vs tramite inversione congiunta. Tale modalità di analisi consente un interpretazione del sottosuolo sino ad elevate profondità e, all'occorrenza, stimare con buona approssimazione la profondità del bedrock sismico e la sua velocità/rigidezza rappresentativa. Generalmente le procedure di inversione non portano ad un ad un unico modello di velocità (non esiste l'univocità della soluzione), pertanto si sono scelti i profili che avessero le seguenti caratteristiche:

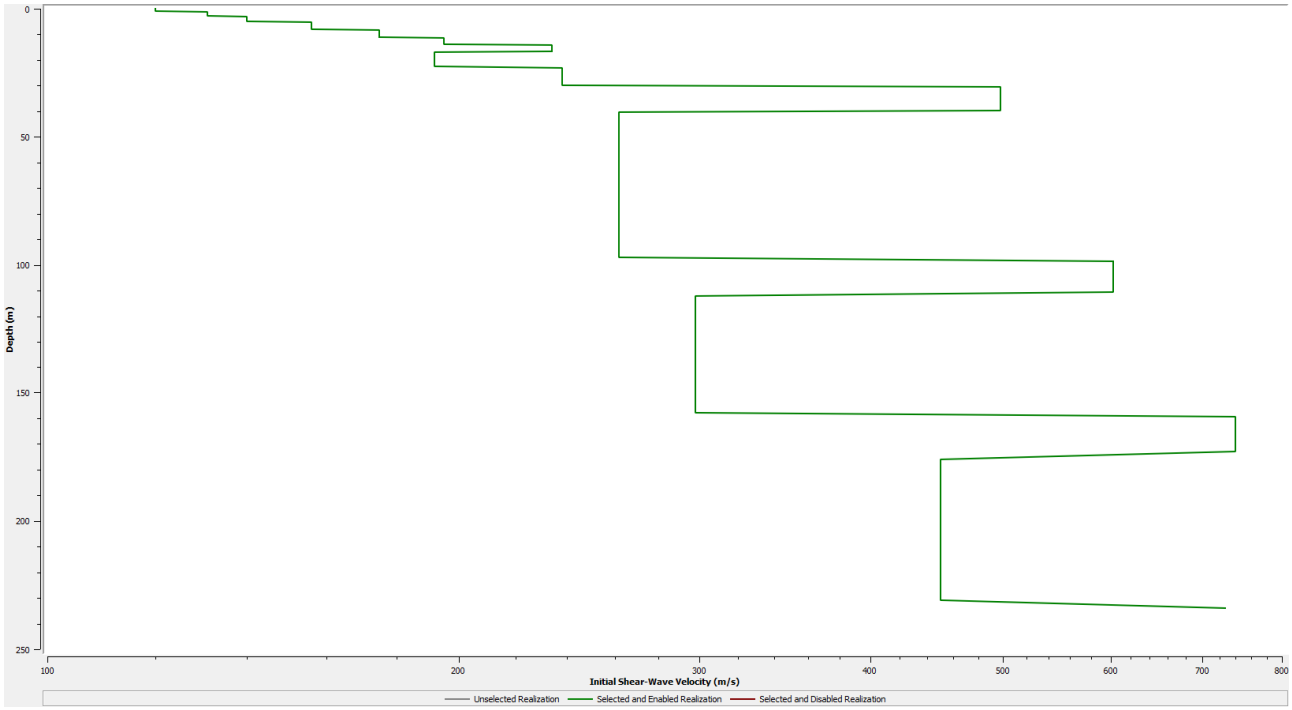
- la miglior compatibilità tra dato sperimentale e teorico
- maggior coerenza con l'assetto geologico di sito (da evidenze dirette e dati di bibliografia)
- profondità del substrato sismico prossimo ai valori attesi per il sito di studio.

Pertanto, sulla scorta di tali elaborazioni (e dei dati di correlazione presenti nel database ed in bibliografia), l'area in studio è stata suddivisa secondo 3 zone rappresentative (vedi figura 6.1), caratterizzate da modelli di sottosuolo e profili di Vs caratteristici (figura 6.2), con individuazione del bedrock sismico, utilizzati nel seguito per le successive modellazioni di RSL, al fine di addivenire alle azioni sismiche di progetto per la stima dei fattori di amplificazione attesi e per le successive analisi di liquefazione.

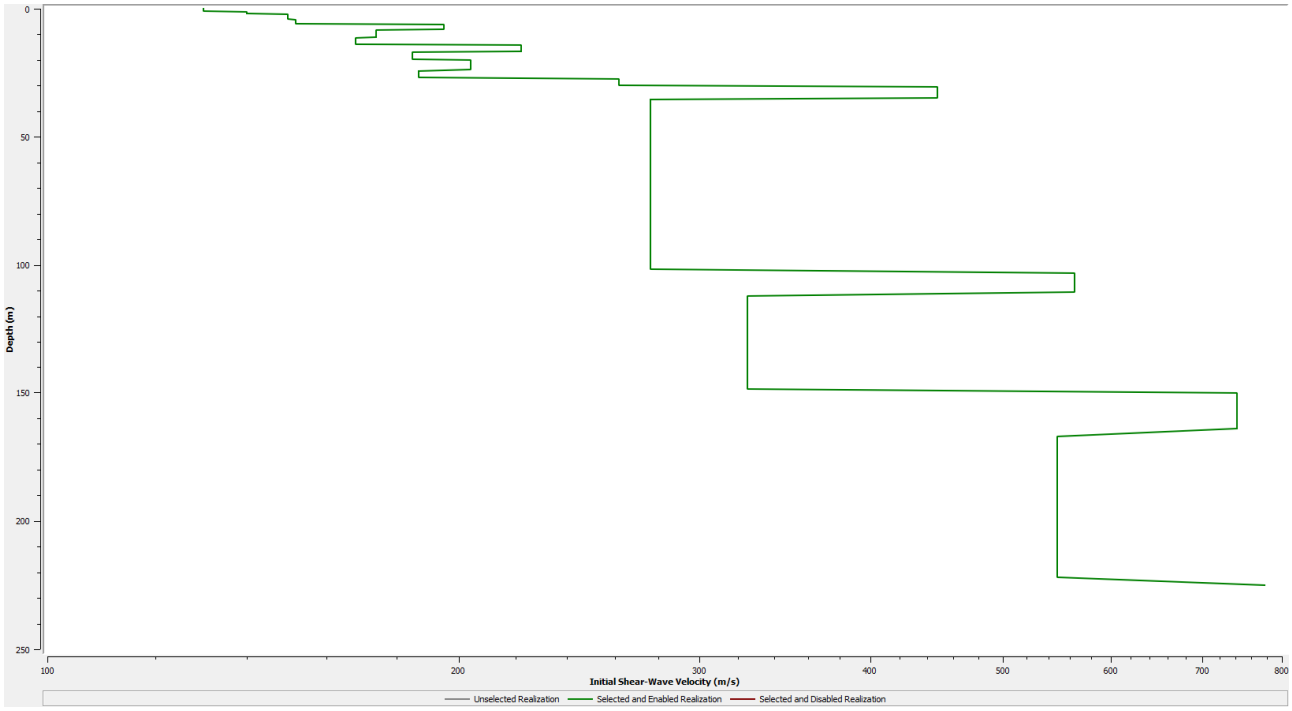
In particolare procedendo lungo la costa da S a N, l'interfaccia con il bedrock sismico adottato, ovvero con significativo contrasto di impedenza ai fini delle analisi di RSL, risulta approfondirsi secondo un modesto gradiente individuabile nel range di frequenze di risonanza pari a 0.38-0.49 Hz (in condizioni puramente elastiche). Sebbene talora (soprattutto nei settori centrali e più a N) vengano individuati picchi di frequenza con valori inferiori a quelli adottati, questi rappresentano frequenze di risonanza al di fuori degli ordinari ambiti di interesse ingegneristico e/o di riferimento per le finalità di pianificazione del presente studio; inoltre rappresentano interfacce particolarmente profonde, ai limiti dei range di affidabilità ed applicabilità degli ordinari modelli di calcolo utilizzati per la stima della RSL a scopi ingegneristici. Tali zone caratteristiche di verifica vengono denominate, procedendo da SE verso NW, come BEL_01, BEL_02, BEL_03 (vedi Figure 6.1 e 6.2). In profondità occasionalmente sono presenti livelli a maggior velocità, imputabili alla presenza di orizzonti ghiaioso-sabbiosi di significativo spessore, evidenziando un trend di frequenza e spessore generalmente calante spostandosi da S verso N.



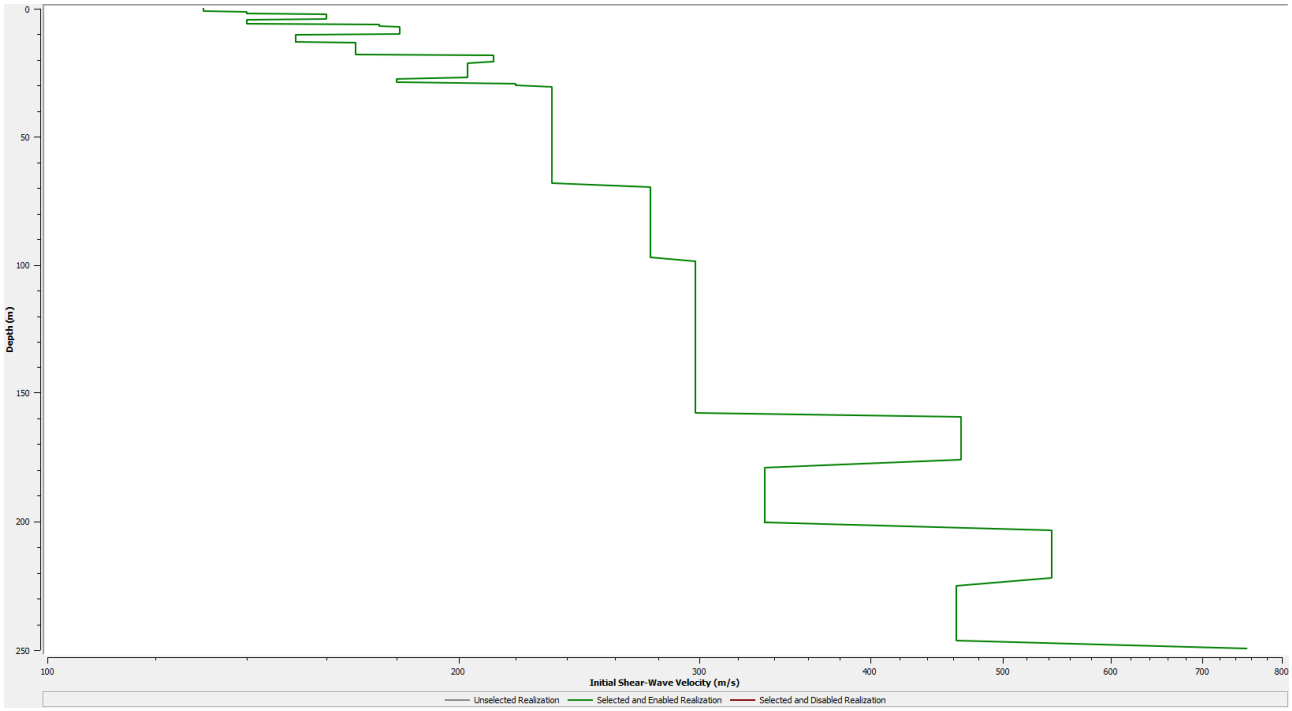

*Figura 6.1- Zone a comportamento dinamico rappresentativo per le RSL presso le aree in studio.*




**Zona *BEL_01***




**Zona *BEL_02***




**Zona *BEL_03***

*Figura 6.2- Profili di Vs rappresentativi per ciascuna zona di RSL in cui è stato suddiviso l'areale in studio, in successione da SE verso NW.*

## 7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

L'areale studiato risulta caratterizzato da un assetto geologico costiero e alluvionale spazialmente variabile, soprattutto in funzione dello spessore dei depositi di copertura e delle relative strutture sedimentarie. La ricostruzioni di tali assetti richiede, pertanto, una diffusa e capillare rete di informazioni geognostiche, talora non sempre possibile, soprattutto nelle aree più urbanizzate. A livello geologico profondo altri elementi di incertezza sono relativi all'elevato spessore dei depositi di copertura alluvionale, interessati da frequenti ed articolate interdigitazioni di litotipi differenti, talora ad oltre cento di metri di profondità, ampliando i margini di incertezza sull'interpretazione degli assetti geologici profondi.

Diversamente gli assetti geologici superficiali, si ritengono adeguatamente investigati, a meno di anomalie geologiche/idrogeologiche locali, determinate soprattutto dall'azione dei corsi d'acqua locali nel tempo e alla loro capacità di divagazione areale e di rimaneggiare i depositi superficiali.

Tali aspetti rivestono particolare importanza anche per quanto riguarda poi la definizione dei modelli geofisici e di comportamento dinamico di riferimento; infatti la mancanza di un adeguato numero e distribuzione di sondaggi sufficientemente profondi e relative indagini geofisiche dirette in foro, nelle aree alluvionali *non consente di rilevare "direttamente"* la posizione e caratteristiche del bedrock sismico così come definito e richiesto dalle norme di settore. Pertanto all'occorrenza ciò è attualmente possibile solo attraverso l'utilizzo di metodi di indagine congiunta (soventi indiretti), basati sul prevalente utilizzo di rumore ambientale quale forzante/ eccitazione energetica. Chiaramente tali metodi e le relative metodologie di elaborazione, portano con se una certa aliquota di incertezze attribuibili sia a fattori strumentali quanto ai modelli numerici interpretativi; per cui nelle analisi di tali dati sperimentali e relative valutazioni di sintesi si ritiene sempre e comunque estremamente necessario attribuire un significativo peso alle conoscenze/evidenze geologiche disponibili ed alla coerenza con il modello geologico di riferimento.

Il programma delle indagini geotecniche va perciò commisurato, oltre che al problema sismico e geotecnico, anche ai codici di calcolo impiegati nelle analisi numeriche (Microzonazione Sismica di livello superiore al I) nonché all'accuratezza dei modelli utili ad affrontare le diverse problematiche di pericolosità sismica (analisi della risposta sismica locale, stima del potenziale di liquefazione, analisi della stabilità dei pendii, valutazione dei cedimenti).

## 8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Nella prima fase di studio, sono stati acquisiti tutti i dati derivanti dal precedente studio di Microzonazione Sismica, quelli bibliografici e d'archivio riguardanti la cartografia geologica, geomorfologica e le indagini geognostiche pregresse nel Comune di Bellaria-Igea Marina. Nella seconda fase sono state definite, di concerto con l'amministrazione comunale ed in funzione delle risorse disponibili agli approfondimenti di

indagine, le aree da sottoporre con maggior attenzione allo studio di Microzonazione Sismica di III Livello; chiaramente l'attenzione prioritaria è stata volta alle zone urbanizzate ed urbanizzabili così come previste nei piani urbanistici comunali e/o di previsione, definendo quindi i settori territorio sul quale eseguire con maggior dettaglio la campagna di nuove indagini geognostiche/geofisiche di approfondimento per le finalità di MS.

Chiaramente tali indagini sono state progettate e pianificate nell'ottica di un perfezionamento ed approfondimento, per quanto possibile, delle conoscenze sui vari assetti geologici e, quindi, per la partizione del territorio di interesse in macro/microzone a comportamento sismico omogeneo sulla scorta di una base di dati sufficientemente robusta.

Quindi i dati sperimentali di nuova e mirata acquisizione, così come quelli derivati dagli archivi pubblici e privati (ritenuti adeguatamente rappresentativi), sono stati utilizzati per analizzare problematiche di MS attraverso modelli numerici di riconosciuta validità scientifica nonché secondo le procedure ed indicazioni raccomandate dalle linee guida regionali e della Protezione Civile.

I risultati di tali elaborazioni sono stati esplicitati, quindi, attraverso le basi dati numeriche allegate al presente studio e gli elaborati grafici di sintesi richiamati al successivo Par. 9.

# 9. ELABORATI CARTOGRAFICI

## 9.1 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I

### *9.1.1 Carta Geologico-Tecnica*

La "Carta Geologico-Tecnica" rappresenta un modello integrato di sottosuolo funzionale alle valutazioni sismiche legate agli studi di Microzonazione Sismica, che permette di individuare in modo semplice ed efficace, i rapporti stratigrafici tra le litologie che rappresentano il substrato formazionale e le coperture.
Tale elaborato, in generale, è costruito in base ad un'attenta valutazione delle Carte Geologiche e Litologiche di riferimento e da un accurata analisi delle prove geognostiche, geotecniche e geofisiche a disposizione.
In dettaglio, la carta viene costruita codificando le litologie e le formazioni affioranti in differenti unità litotecniche specificate dagli standard di archiviazione informatica 4.2 allegati alle linee guida "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica".

Nel caso specifico, è necessario ricordare (come già descritto al capitolo 4) che i depositi di superficie prettamente alluvionali affioranti nelle aree di studio, risulteranno sostanzialmente omogenei in funzione delle MACROAREE di appartenenza (LITORALE, ALLUVIONALE), in virtù degli ambiti deposizionali, processi sedimentari e aspetti litogenetici caratteristici.

Pertanto le unità geo-litologiche alluvionali di superficie sono sostanzialmente rappresentate dall'Unità di Modena (AES8a) e dal Sub-Sintema di Modena Ravenna ($AES_8$).

Pertanto, per ottenere un Carta Geologico-Tecnica che rappresentasse adeguatamente le condizioni del territorio in esame, in ambito di pianura costiera e alluvionale, è stato scelto di procedere come segue:

- Dai risultati dei numerosi dati geognostici sono state estrapolate le stratigrafie che consentivano di caratterizzare ed individuare con certezza (ove possibile) la posizione, spessore e caratteristiche dei livelli stratigrafici maggiormente significativi;
- Dato il substrato profondo ci si è avvalsi anche di dati e informazioni desumibili dalle sezioni geologiche profonde CARG e dal database associato alla carta geologica regionale;
- E' stata valutata, in ciascun log stratigrafico estrapolato, la litologia prevalente, la natura geologica e il possibile ambiente deposizionale;
- Le differenti litologie evidenziate, derivate dai dati puntuali di sondaggio, sono state interpolate in pianta per ottenere una realistica distribuzione sul territorio;
- Ciascuna litologia (ed ovviamente ciascun poligono ad essa associato) è stato codificata in unità litotecnica per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica.
- Sono stati cartografati i terreni di copertura (con spessori > 3 metri) suddivisi su base granulometrica con l'indicazione dell'ambiente genetico/deposizionale.
- Sono state cartografate le forme di superficie e sepolte.
- Sono stati cartografati gli orli di terrazzo fluviale e marino.

Questi dati si sono resi necessari alla definizione del modello geologico del sottosuolo per l'intero territorio e propedeutici per la definizione in chiave sismica degli effetti attesi al suolo.

In carta sono inoltre rappresentate le tracce delle sezioni litotecniche (di superficie e profonde) elaborate e/o ritenute rappresentative per l'ambito comunale, generalmente ortogonali fra loro e passanti per gli abitati principali. Tali sezioni, realizzate sul profilo topografico del terreno e lungo una rete di sondaggi, vengono riportate in allegato alla presente relazione ed a scala varia (vedi Allegato 2), in funzione del grado di risoluzione necessario ad illustrate l'assetto locale, permettendo di definire gli andamenti e lineamenti geologici principali nonché di definire le dinamiche evolutive dell'area e gli aspetti geomorfologici e strutturali salienti.

In particolare tali sezioni (denominate da 1-1' a 9-9') risultano un importante ausilio per la stima della profondità del bedrock geologico, nonché un robusto riferimento per la correlazione dei picchi di frequenza H/V con strutture geologiche profonde e, all'occorrenza, poter individuare il bedrock sismico di riferimento nei vari punti di verifica.

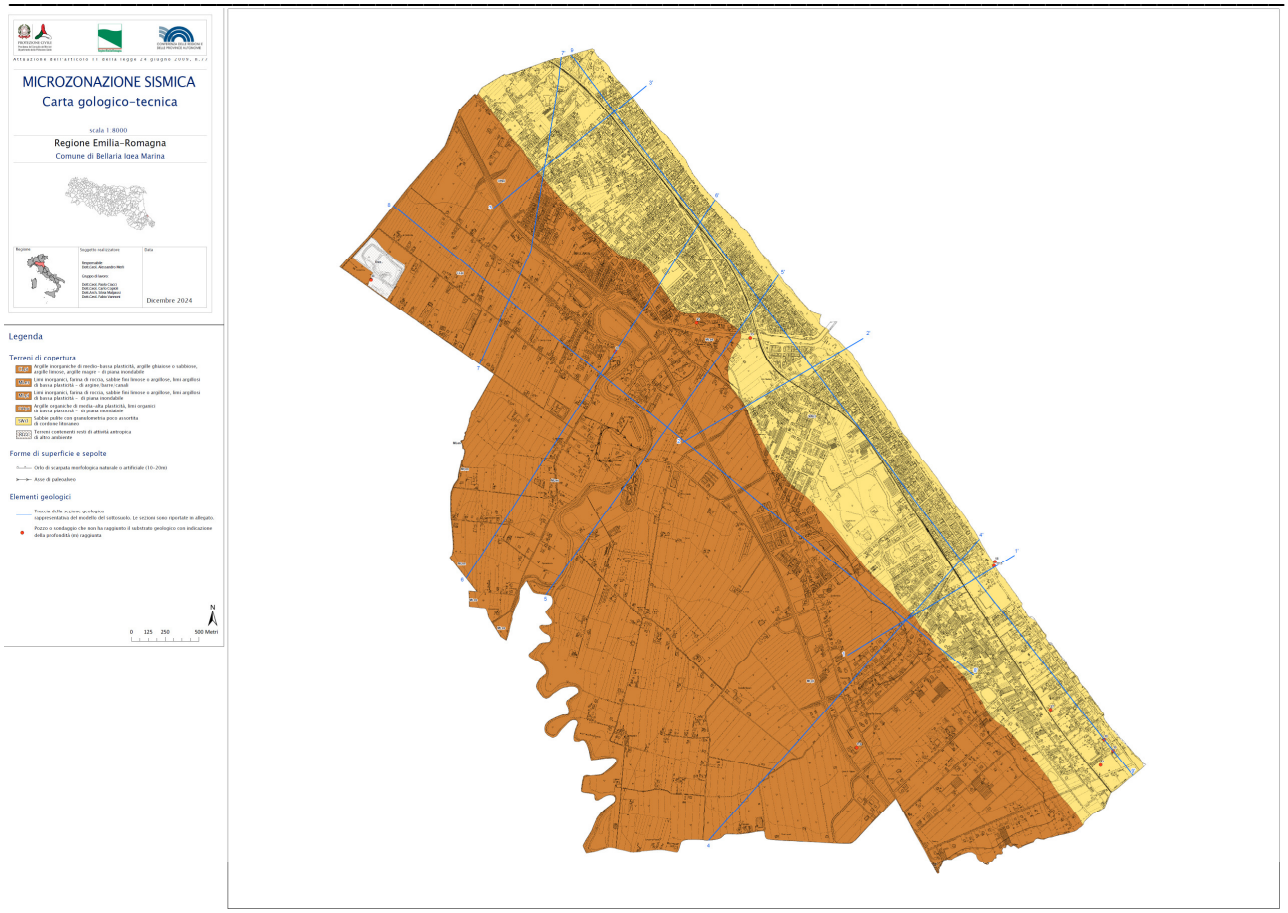



*Figura 9.1.1 – Miniatura esemplificativa di una Carta Geologico-Tecnica*

### *9.1.2 Carta delle Frequenze Naturali del Terreno*

Sulla base dei risultati delle registrazioni a stazione singola HVSR, ritenute più rappresentative (sia di nuova realizzazione che pregresse), si è sviluppata la mappa delle Frequenze Naturali dei terreni dell'ambito comunale studiato.

Nonostante, comunemente, negli studi di Microzonazione Sismica venga prodotta un'unica carta delle Frequenza Naturali, è stato scelto in questo caso di sviluppare 2 differenti elaborazioni (frequenze f0 ed f1) contenute nella medesima carta per non perdere importati informazioni legate a massimi risonanti secondari, talora significativi ai fini della risposta sismica di sito; questi ultimi risultano particolarmente condizionati dall'assetto geologico locale, caratterizzato dalla presenza di spessi depositi di copertura talora con orizzonti risonanti interclusi (es. orizzonti ghiaiosi) o, comunque, per interfacce con contrasti di rigidezza particolarmente significativi (es. copertura alluvionale/substrato geologico).

Al fine di chiarire quanto appena espresso viene di seguito riportato un esempio sui criteri di elaborazione adottati; talora, a seguito degli effetti di smorzamento indotti da depositi soffici e profondi e/o dalla presenza di situazioni stratigrafiche con inversioni di velocità, il giudizio e la definizione dei picchi di frequenza sono stati guidati anche dal reciproco andamento delle singole componenti verticali ed orizzontali del moto registrato. In figura 9.1.2 è riportata, a titolo di esempio, la misura 099001P43.

Ad es. la misura con codice 099001P43, così come la maggior parte dei rilievi realizzati, è caratterizzata da più massimi in Frequenza. Quello a significativa ampiezza e minor valore in frequenza viene indicato come f0 che, nell'esempio, presenta una frequenza di circa 0.44 hz con ampiezza media di circa 1.7; parimenti viene rilevato anche il picco superiore f1, caratterizzato da una frequenza di circa 2.4 hz con ampiezza media di circa 1.6.

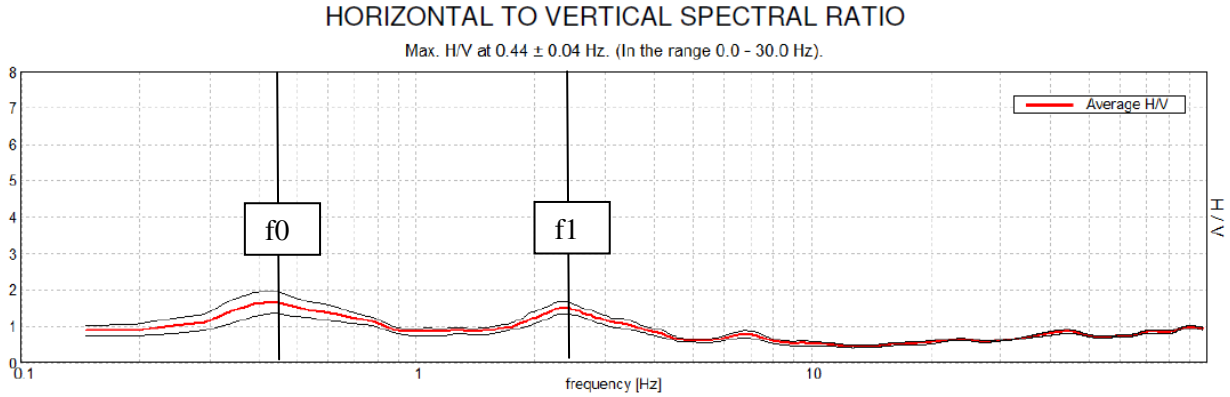



*Figura 9.1.2-Curva dei rapporti spettrali relativa alla registrazione 099001P43.*

I picchi di frequenza ingegneristicamente rappresentativi per l'intervallo di frequenze di risonanza delle strutture ricadono all'incirca tra 0.5 e 15 Hz e, dunque, possono risultare potenzialmente pericolosi per fenomenologie di amplificazione locale o, comunque, di alterazione del moto sismico atteso. Il picco a maggior ampiezza ed a più bassa frequenza "f0" indica il "contrasto d'impedenza sismico" più significativo in profondità ed a cui è associata la maggior aliquota di trasferimento dell'energia del moto vibratorio/sismico e, pertanto, risulta informativo ai fini della ricostruzione del substrato sismico dell'area. Inoltre tutti i valori di frequenza individuati con tale tecnica, essendo il frutto di medie statistiche, sono affetti da una deviazione standard che ne può comportare uno scostamento talora di entità pari al 20-25% del valore definito.

Per la correlabilità dei picchi/range di frequenza rappresentativi con elementi stratigrafici significativi ci si può riferire alle indicazioni contenute nella DGR 564/2021 nonché alle analisi e modelli definiti in Mascandola et al., 2019. Al proposito, quale elemento distintivo riconoscibile su tutto il territorio, si constata la presenza di picchi di frequenza generalmente caratterizzati da modesti rapporti H/V, la cui presenza viene rilevata con maggior dettaglio tramite l'utilizzo di strumentazioni più sensibili alle basse frequenze; in ogni caso su tutto il comune le frequenze fondamentali vengono rilevate nel campo f<0.5 hz. Tuttavia si possono osservare dei trend generali per cui, muovendosi da SE verso NW si assiste ad una modesta migrazione dei picchi rappresentativi a minor frequenza verso valori decrescenti attestandosi, talora, su valori minimi entro un range di 0.25<f<0.31, nonché ad un generale appiattimento dei rapporti H/V (imputabile verosimilmente sia ad una riduzione di spessore/estensione dei livelli francamente ghiaiosi che ad un effetto di smorzamento ad opera del maggior spessore delle coperture sedimentarie). In ogni caso massimi secondari particolarmente significativi ai fini delle analisi di RSL risultano essere i picchi H/V presenti nei range 1.2-1.5 hz e 2.0-2.5

hz, generalmente rappresentativi del contrasto di impedenza associabile all'interfaccia di riferimento adottata per le analisi numeriche e/o alla presenza di orizzonti maggiormente rigidi e competenti, assimilabili a livelli ghiaioso/sabbiosi di significativo spessore ed estensione.

I valori di ampiezza rappresentativi per ciascuna classe di frequenza, vengono quindi illustrati tramite diversa colorazione dei simboli secondo specifici range caratteristici per l'area, modulando l'ampiezza del simbolo in funzione dell'ampiezza dei relativi picchi H/V, secondo la seguente schematizzazione (vedi figura 9.1.3):

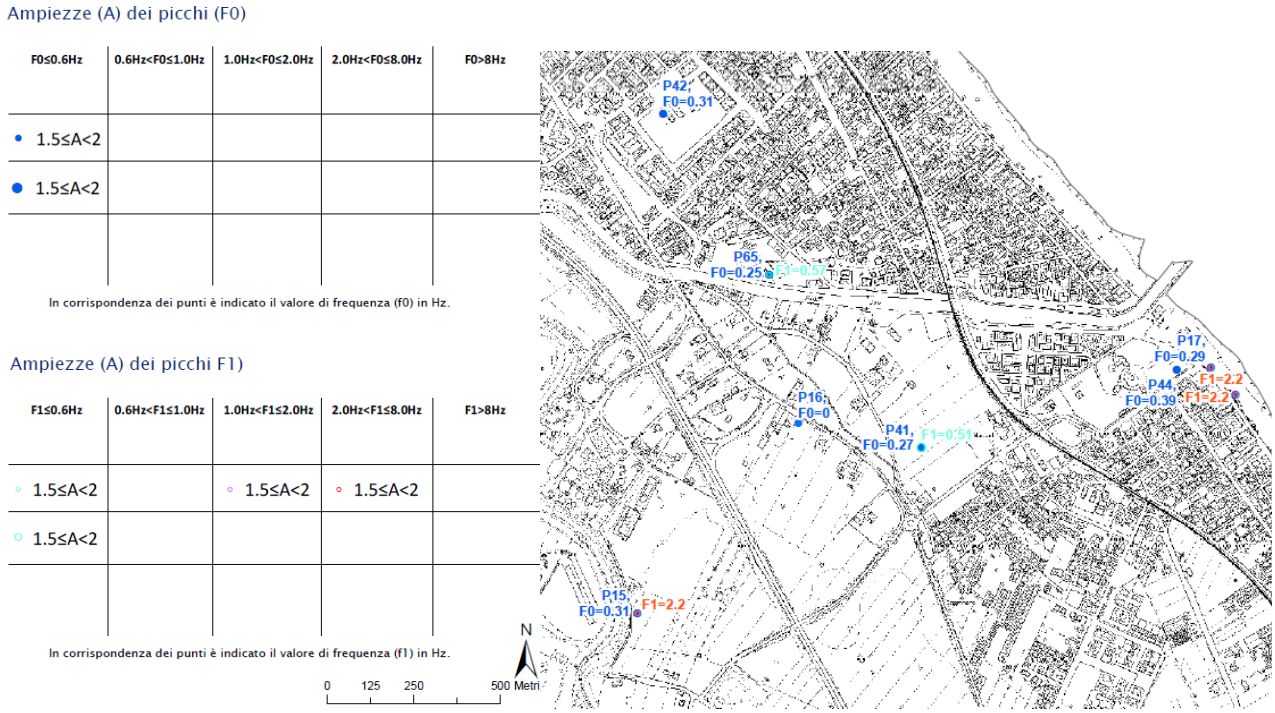



*Figura 9.1.3 - Codifiche per la visualizzazione in mappa delle Frequenze e della Ampiezze individuate dai rilievi HVSR.*

In base a quanto esposto in figura 9.1.4 ne viene riportata un esempio in miniatura della tavola.

E' necessario precisare che, talora, esistono anche ulteriori massimi con frequenza F>15 Hz che, differentemente dai precedenti, non sono stati caratterizzati perché ritenuti non particolarmente significativi per la pericolosità sismica dell'area. Questa tipologia di massimi rappresenterebbe infatti occasionali contrasti di impedenza molto superficiali che, in relazione al normale piano di fondazione degli edifici, è ragionevolmente non significativo.

E' opportuno comunque ricordare che esiste abbondante letteratura comprovante il fatto che l'ampiezza del picco H/V, pur essendo legata all'entità del contrasto di impedenza tra strati, non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice (cfr. Mucciarelli e Gallipoli, 2001; SESAME, 2005 e referenze ivi contenute) e può essere sensibilmente influenzata da altre variabili naturali e strumentali.

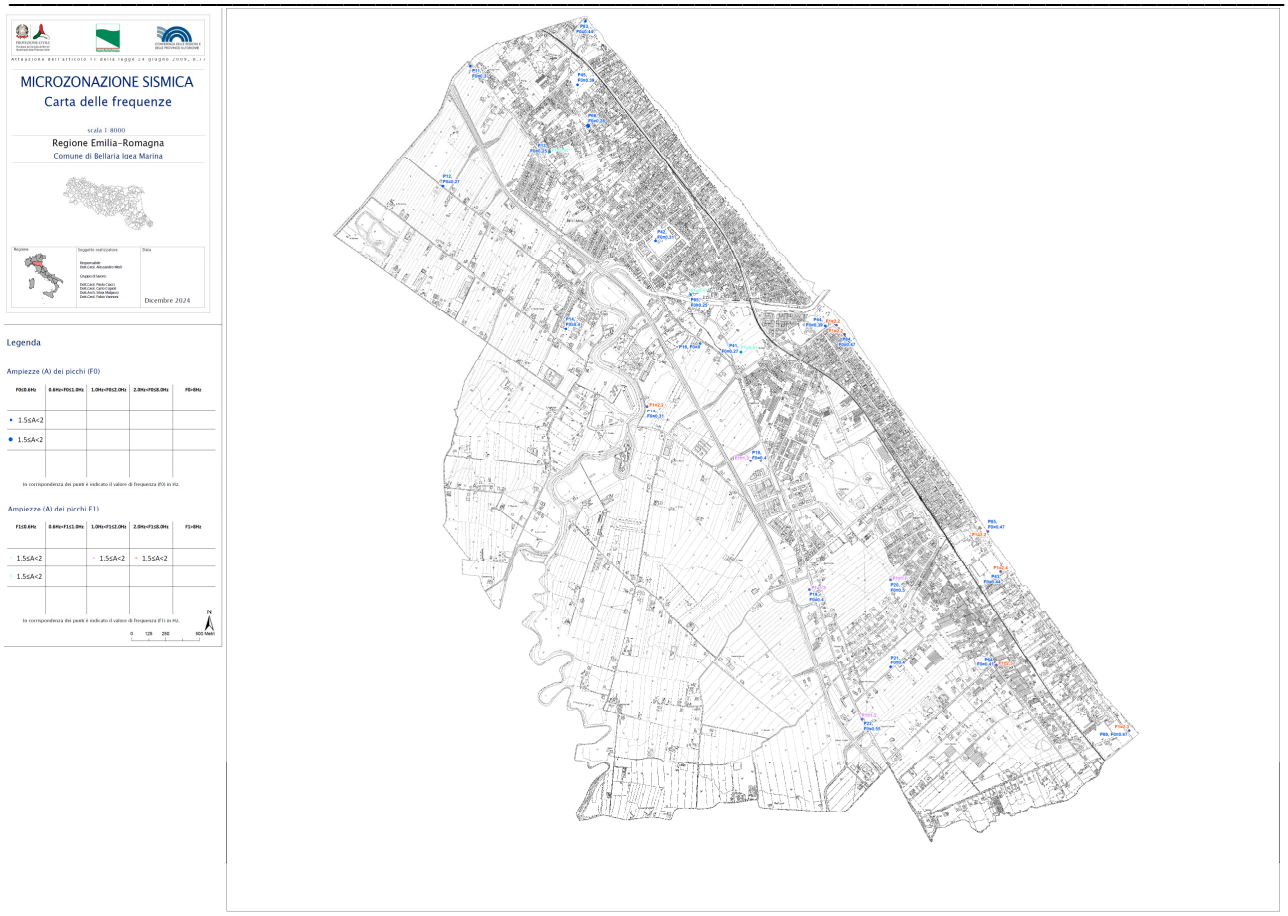



*Figura 9.1.4 – Miniatura esemplificativa della Mappa delle Frequenze Naturali dei Terreni (F0).*

### *9.1.3 Carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica)*

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica di Livello 1 costituisce il documento fondamentale di questo livello di approfondimento. La carta individua le microzone ove, sulla base di osservazioni geologiche e geomorfologiche e delle valutazione dei dati litostratigrafici è prevedibile l'occorrenza di diversi tipi di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, liquefazione, ecc…). Sulla base degli elementi geologico-morfologici individuati, precedentemente descritti e già riportati nella Carta Geologico Tecnica e delle colonne litostratigrafiche desumibili dalle prove geognostiche, è stata redatta la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica, restituita a scala 1:10.000.

In funzione delle informazioni rappresentate, la legenda è distinta nelle seguenti parti:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.
- Zone suscettibili di instabilità.
- Forme di superficie e sepolte.
- Tracce di sezione topografica.
- Punti di misura del rumore ambientale.

In riferimento agli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica del Dipartimento di Protezione Civile e gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica MS versione. 4.2, sono state individuate e delimitate le zone a comportamento equivalente in occasione di sollecitazione sismica.

Per la copertura dell'area di studio è stata sviluppata 1 tavola dell'elaborato MOPS di cui nel seguito se ne riporta una miniatura.

Le microzone possono essere classificate in tre categorie:

a) zone stabili, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura (substrato geologico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata – pendii con inclinazione inferiore a circa 15°);

b) zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, per effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale;

c) zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti nel territorio. I principali tipi di instabilità sono: instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci e cedimenti differenziali.

In base a tale modalità di classificazione ed alle peculiarità del territorio studiato si possono trarre le seguenti considerazioni:

Zone stabili

All'interno del territorio del territorio comunale non sono state riscontrate microzone definibili come "stabili". Questo è dovuto in particolare al fatto che non è presente in affioramento a bassa acclività il bedrock sismico ne quello geologico inalterato.

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

All'interno dei territori in studio sono presenti Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali per soli motivi stratigrafici. La litologia prevalente delle coperture è sicuramente influenzata dai processi deposizionali e genetici di messa in posto dei sedimenti, costituita prevalentemente da depositi di piana alluvionale limoso-argillosi di significativo spessore (sino ad oltre 300 mt nei settori più profondi della conoide alluvionale entro il territorio comunale) con subordinati depositi di canale localmente più grossolani (strutture di canale e paleoalveo) rappresentate dalle colonnine stratigrafiche con codice 2001-2002-2003-2004 (quest'ultima interessata in superficie da depositi antropici).

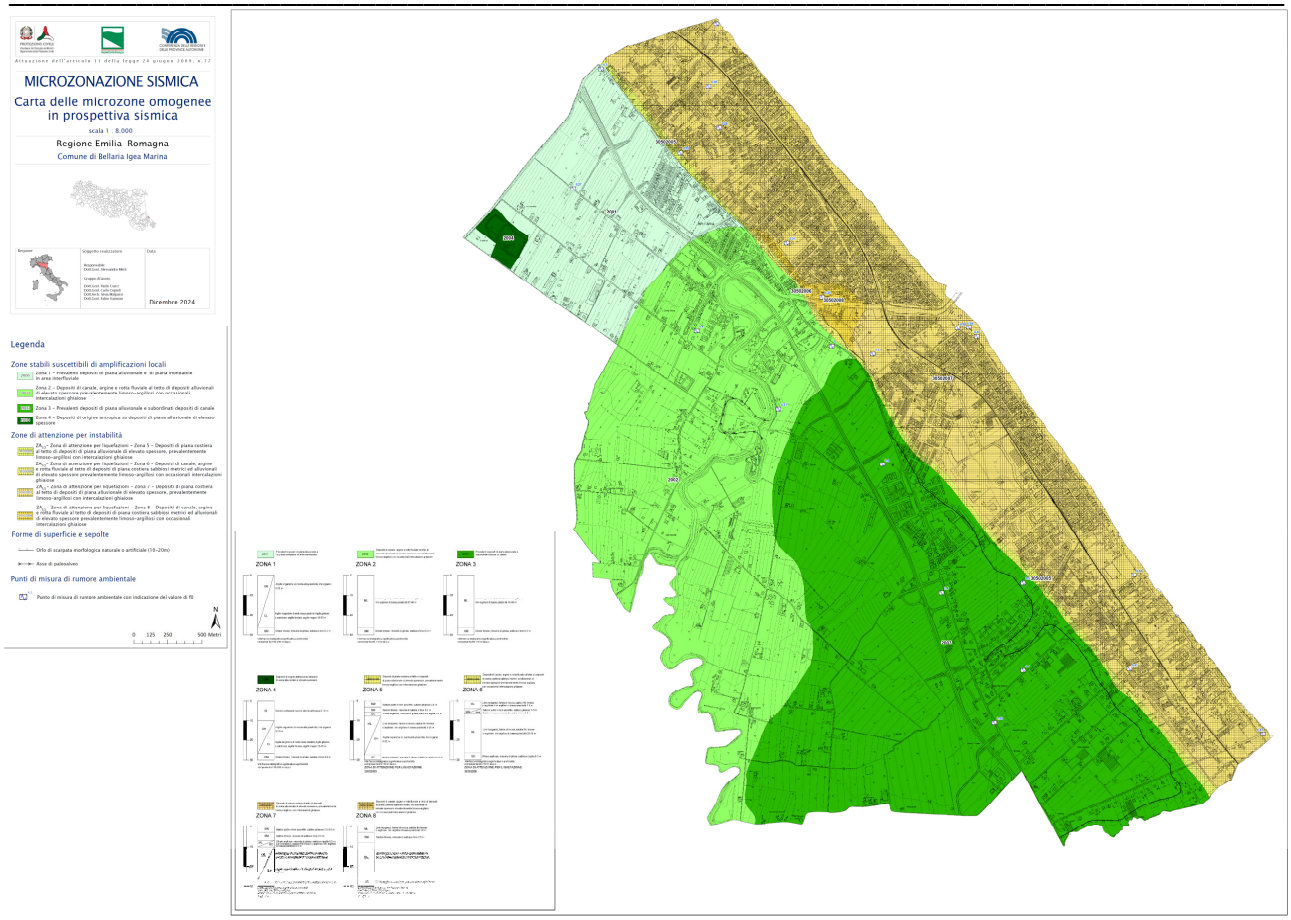



*Figura 9.1.5 - Miniatura esemplificativa della Carta delle MOPS.*

Le problematiche di instabilità per potenziale liquefazione risultano interessare la piana costiera, a valle della paleofalesia, ove è situata la parte preponderante dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, scuole, area portuale, ecc.). Tale piana è costituita da depositi sabbiosi del prisma costiero sovrastanti la spessa conoide alluvionale. A tal proposito si rammenta come a seguito degli approfondimenti di Livello III, svolti secondo scenari di pericolosità sismica definiti per un tempo di ritorno di Tr≤475 anni, una parte delle zone costiere individuate come "Zone di attenzione per instabilità" (Zone 30502005 e 30502006), in virtù di particolari aspetti deposizionali (litologia e interferenza con i depositi del T. Uso) o di assetto stratigrafico (tratto di assottigliamento/chiusura dei depositi costieri al piede della paleofalesia), siano risultate contraddistinte da valori di potenziale di liquefazione 0≤IL≤2, generalmente indice di una bassa probabilità di occorrenza oltreché di modeste manifestazioni superficiali e ridotti cedimenti post-sismici attesi. Pertanto nelle carte di approfondimento superiore (Livello III) tali aree sono state stralciate dalle Zona di Suscettibilità per la Liquefazione.

Tuttavia si ribadisce come tali valutazioni siano afferibili solo a scenari con Tr≤475 anni, mentre per tempi di ritorno superiori, in virtù degli assetti stratigrafici ed idrogeologici ivi rilevati, possa talora sussistere il rischio per liquefazione e, all'occorrenza, debba essere attentamente valutato.

La corrispondenza tra elementi di copertura geologico-tecnici prevalenti e le Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali della Carta delle MOPS diventano quindi le seguenti:

Zone stabili: n. 4

| codice colonnina | copertura |
|---|---|
| 2001 | OH/CL |
| 2002 | ML |
| 2003 | ML |
| 2004 | RI |

Zone suscettibili di instabilità

Le zone suscettibili di instabilità riguardano problematiche di instabilità per liquefazione. Esse risultano interessare gran parte dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, portocanale, scuole, caserme, ecc.) presso le località costiere, ricche in orizzonti superficiali prevalentemente sabbiosi/incoerenti con modesto stato di addensamento che risultano potenzialmente instabili in condizioni sismiche e che, nell'ambito degli approfondimenti di III Livello, verranno analizzate secondo scenari di pericolosità sismica definiti per un tempo di ritorno di Tr=475 anni:

Zone Instabili: n. 4

| codice colonnina | copertura |
|---|---|
| 2005 | SW |
| 2006 | ML |
| 2007 | SW |
| 2008 | ML |

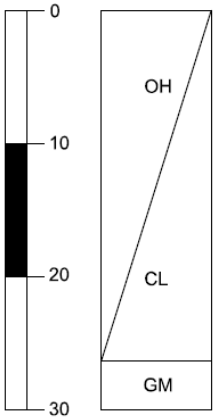
Per i dettagli delle singole zonazioni si rimanda pertanto alla tavola delle MOPS.

Nell'area di studio, con particolare riferimento alle zone urbanizzate ed urbanizzabili, non sono presenti elementi strutturali (faglie, ecc..) certi, in quanto dalla consultazione del database Itaca non è stato rilevato alcun elemento tettonico attivo e capace, certo e documentato, che possa determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in oggetto.

Di seguito si riporta una descrizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica, definibili per le aree in esame, con gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (ogni colonnina riporta le litologie prevalenti con una breve descrizione ed è associata ad una microzona in pianta):

2001 Prevalenti depositi di piana alluvionale e di piana inondabile in area interfluviale

## ZONA 1




Argille organiche di media-alta plasticità, limi organici 0-20 m

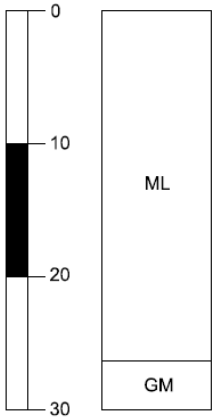
Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, Argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre 10-30 m

Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo 0-3 m

Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 150-200 m da p.c.

2002 Depositi di canale, argine e rotta fluviale al tetto di depositi alluvionali di elevato spessore prevalentemente limoso-argillosi con occasionali intercalazioni ghiaiose

## ZONA 2



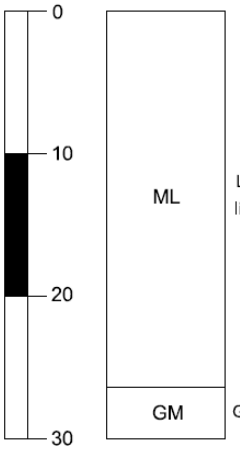

Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità 25-40 m

Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo 0-5 m

Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 90-110 m da p.c.

2003 Prevalenti depositi di piana alluvionale e subordinati depositi di canale

## ZONA 3



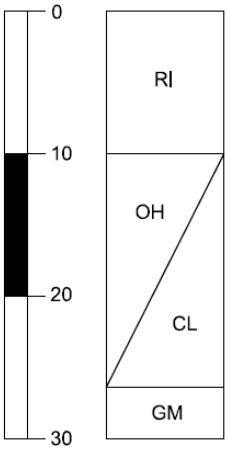

Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità 18-40 m

Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo 0-5 m

Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 90-110 m da p.c.

2004 Depositi di origine antropica su depositi di piana alluvionale di elevato spessore

## ZONA 4



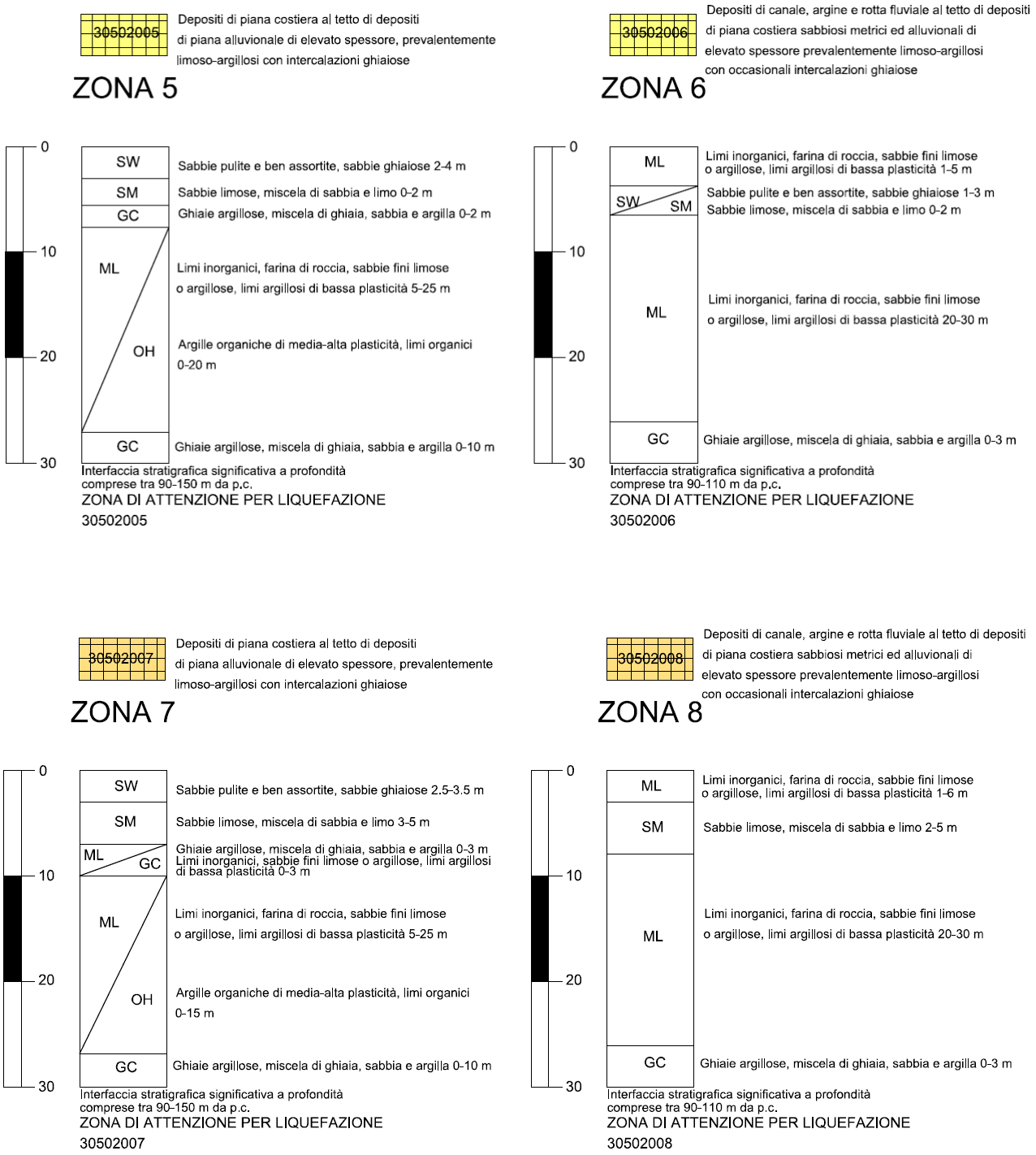

Terreni contenenti resti di attività antropica 2-10 m

Argille organiche di media-alta plasticità, limi organici 0-10 m

Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, Argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre 10-20 m

Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo 0-3 m

Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 150-200 m da p.c.




Per tutte le zone illustrate sono attese amplificazioni del moto sismico per soli motivi stratigrafici (in quanto le aree risultano sub pianeggianti).

Tali fenomeni, ove ipotizzabili, sono stati successivamente quantificati tramite gli approcci semplificati indicati nelle ICMS 2008 per scarpate e versanti con conformazione a cresta (paragrafo 3.3, pag. 158-160, Volume 3).

## 9.2 MICROZONAZIONE SISMICA AL II LIVELLO DI ANALISI

### *9.2.1 Carta delle velocità delle onde di taglio "Vs"*

Per la costruzione della carta delle velocità delle onde di taglio sono state utilizzate le indagini di misura indiretta maggiormente rappresentative che hanno consentito di raggiungere profondità ≥ 30 m, avvalendosi a titolo correlativo di tutte le altre prove a minor penetrazione.
I test di misura geofisica diretta utilizzati risultano suddivisi come segue:

- 24 prove Puntuali HVSR;
- 3 prove Puntuali SCPT;
- 3 prove Puntuali Down Hole;
- 3 Lineari in array monodimensionale (Masw);
- 3 Lineari in array bidimensionale (ESAC/SPAC);

In Figura 9.2.1 è possibile osservare la distribuzione sul territorio delle differenti indagini sismiche: ogni rilievo è stato codificato come riportato negli standard di archiviazione e rappresentazione informatica 4.2 riferiti a "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica".
In base alle caratteristiche dei depositi di copertura ed alla profondità del substrato geologico di misura, per ciascun sito si è valutato il valore rappresentativo di Vs30.

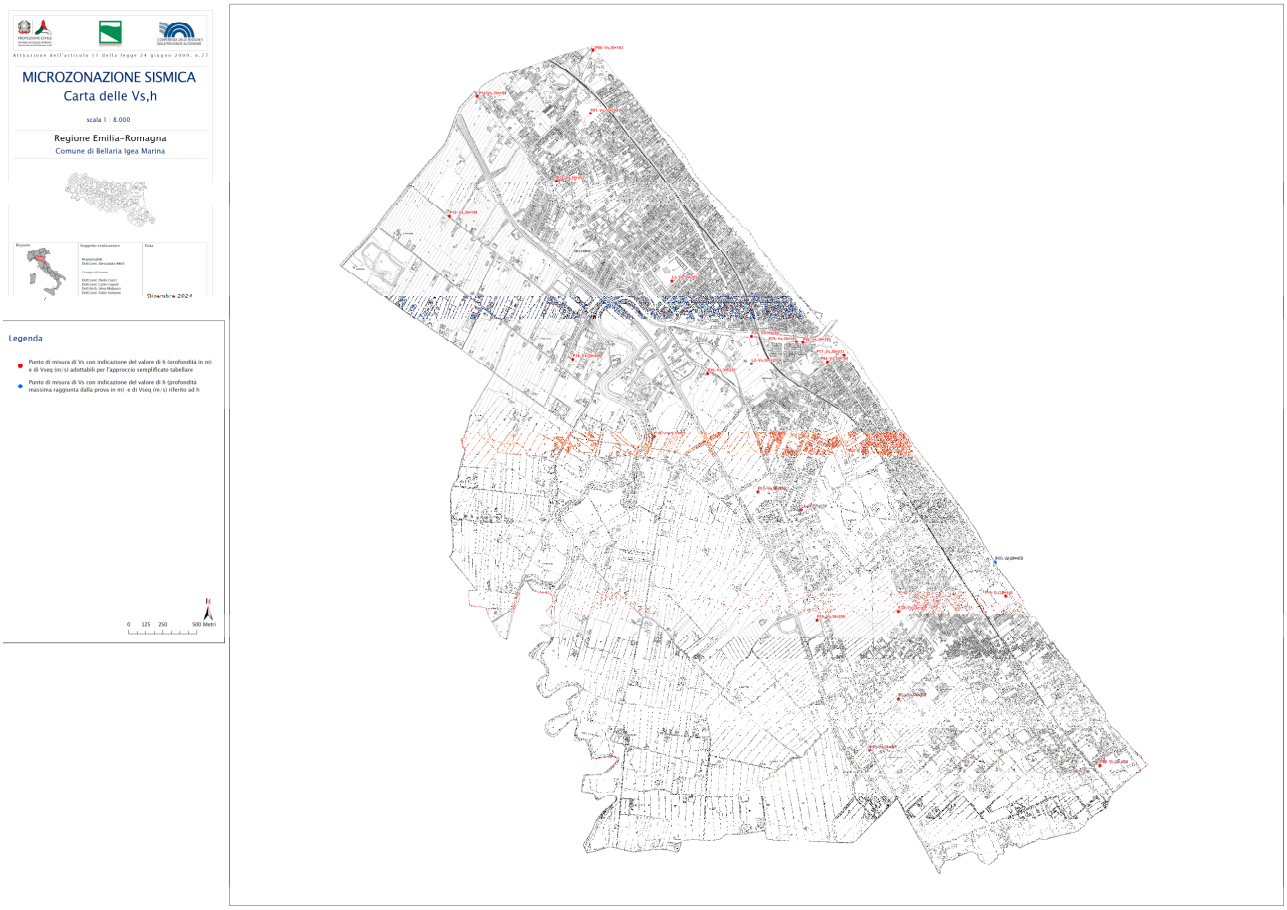



*Figura 9.2.1 – Miniatura esemplificativa della carta delle velocità delle onde di taglio VsH.*

### *9.2.2 Carte dei Fattori di Amplificazione Stratigrafica*

I terreni in studio di Bellaria-Igea Marina, data la conformazione ed estensione del territorio comunale, presentano caratteristiche litologiche solo a tratti differenti (vedi Cap. 4), per cui le maggiori variazioni risultano nello spessore delle coperture alluvionali sul substrato formazionale geologico, nella presenza di intercalazioni ghiaiose e nella locale presenza di depositi sabbiosi costieri.

Per quanto attiene i settori di microzonazione di II Livello, ovvero tutto il territorio a monte della piana costiera (e della paleofalesia), sono stati discretizzati schematizzando situazioni geologiche omogenee al fine di poter stimare in maniera consona i fattori di amplificazione sismica tramite metodo semplificato tabellare proposto nella DGR 630/2019 e successivo aggiornamento DGR 476/2021. Quindi sulla base della descrizione del contesto geologico di applicazione di ciascuna tabella e delle profondità attese per il substrato, si sono utilizzati i parametri di amplificazione definiti nelle tabelle denominate “Margine di tipo B” e “Pianura 2”. Per cogliere in modo maggiormente significativo la variazione dei fattori di amplificazione (FA) a livello locale ed in funzione degli effetti stratigrafici, il territorio è stato suddiviso in due settori principali in virtù delle caratteristiche litostratigrafiche e dei contrasti di impedenza rappresentativi (vedi figura 9.2.2). L’assegnazione dei relativi parametri tabellari è stata definita attraverso la stima puntuale del parametro di velocità equivalente VsH=Vs30, secondo la seguente formulazione:

$Vs_H = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} h_i/Vs_i}$ dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, H è lo spessore totale (in m) dei terreni di copertura o profondità del tetto del substrato, hi = spessore (in m) dello strato i-esimo (fino al substrato), Vsi = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al substrato).

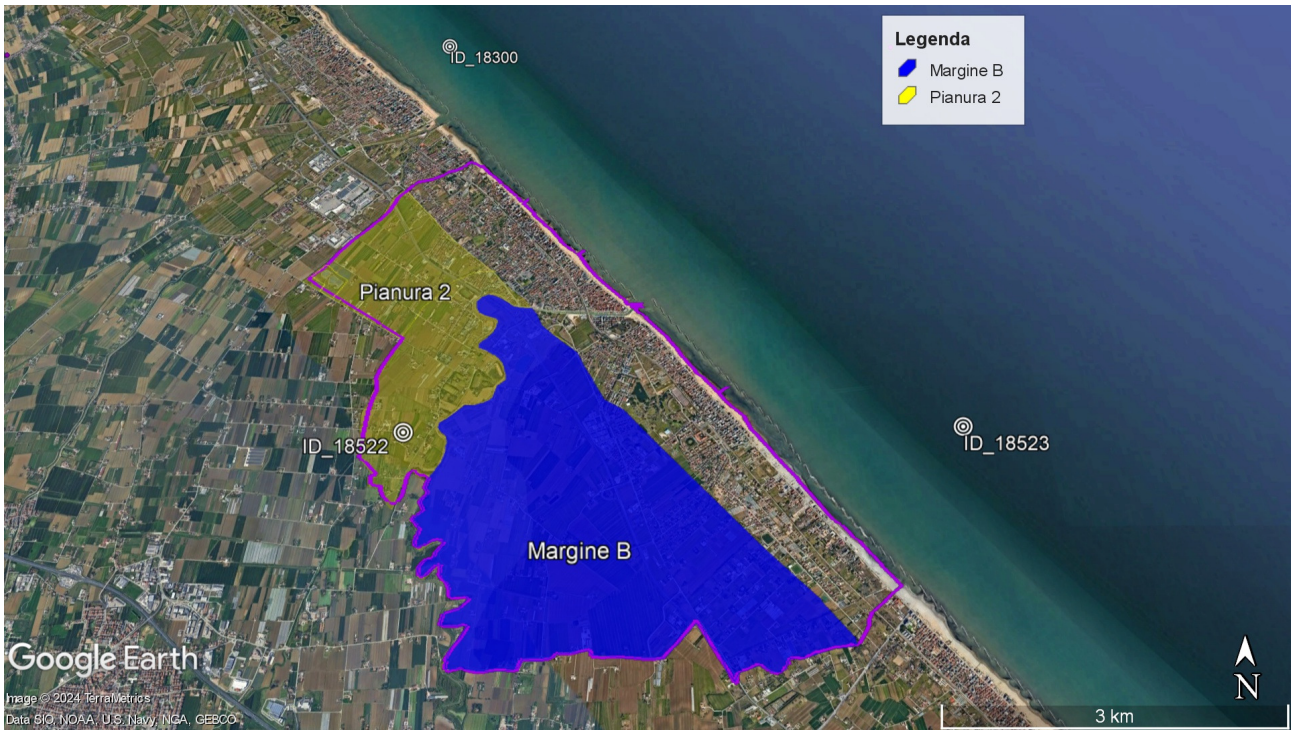



*Figura 9.2.2 – Schema di applicazione delle tabelle di approccio semplificato per la stima dei fattori di amplificazione sismica nei diversi ambiti geologici del territorio comunale.*

Pertanto per le analisi di II Livello ci si è avvalsi del valore di Vs30 utile alla stima dei fattori di amplificazione sismica di ciascuna relativa microzona. Tali scelte sono state guidate anche sulla scorta delle considerazioni ed esperienze illustrate nello studio "Revisione della suddivisione del territorio regionale in ambiti geo-litologici omogenei (A. Tento, L. Martelli, A. Marcellini, 2015)", alla base della definizione delle nuove tabelle di approccio semplificato per MS2.

Gli ambiti vengono quindi caratterizzati dai seguenti Fattori di amplificazione per effetto stratigrafico che intervengono sulle ampiezze spettrali (in accelerazione e velocità):

$F_{PGA}$ = *PGA/PGA0*, dove *PGA0* è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento e *PGA* è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito;

*FA* = *SA/SA0*, dove *SA0* è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e *SA* è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T: *SA1* per 0,1s≤T≤0,5s, *SA2* per 0,4s≤T≤0,8s, *SA3* per 0,7s≤T≤1,1s, *SA4* per 0,5s≤T≤1,5s;

*FH = SI/SI0*, dove *SI0* è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e *SI* l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T: *SI1* per 0,1s≤T≤0,5s, *SI2* per 0,5s≤T≤1,0s, *SI3* per 0,5s≤T≤1,5s.

In dettaglio, le 8 carte di Microzonazione di II Livello (Fa-PGA - Fa_SA1 - Fa_SA2 - Fa_SA3 - Fa_SA4 - Fa_SI1 - Fa_SI2 - Fa_SI3) sono state costruite come segue:

- A ciascuna Microzona individuata nella carta delle MOPS è stato assegnato, in base ai rilievi disponibili riportati nella mappa delle velocità, un unico valore rappresentativo di Vs. Tale valore è stato assegnato in termini di VsH = Vs30 (in funzione del contesto geologico e profondità del bedrock geofisico o contrasti di impedenza significativi).
- In base a ciascun valore Vs assegnato alle varie zone (Vs30) è stato successivamente possibile identificare e/o accoppiare Microzone a comportamento dinamico simili, suddividendo il territorio in zone a caratteristiche amplificative omogenee.
- In base agli abachi proposti nella DGR 630/2019 e successivo aggiornamento DGR 476/2021 (riportati in Figura 9.2.3) denominati rispettivamente A2.1.2 - "Margine di tipo B" e A2.1.1- "PIANURA 2", sono stati quindi assegnati i Fattori di Amplificazione corrispondenti alla classe di VsH = Vs30 precedentemente determinata.

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PGA | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,5 |

Fattore di Amplificazione **PGA**

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SA1 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,5 |
| SA2 | 2,7 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 1,9 | 1,8 |
| SA3 | 3,3 | 3,2 | 2,8 | 2,5 | 2,3 | 2,1 |
| SA4 | 3,3 | 3,1 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 1,9 |

Fattori di Amplificazione **SA1** (0,1s≤T≤0,5s), **SA2** (0,4s≤T≤0,8s), **SA3** (0,7s≤T≤1,1s), **SA4** (0,5s≤T≤1,5s)

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SI1 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,6 |
| SI2 | 3,1 | 3,0 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 2,0 |
| SI3 | 3,6 | 3,3 | 2,9 | 2,5 | 2,2 | 2,0 |

Fattori di Amplificazione **SI1** (0,1s≤T≤0,5s), **SI2** (0,5s≤T≤1,0s), **SI3** (0,5s≤T≤1,5s) a)

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PGA | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 |

Fattore di Amplificazione **PGA**

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SA1 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,5 |
| SA2 | 2,6 | 2,6 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,7 |
| SA3 | 3,1 | 2,9 | 2,7 | 2,4 | 2,3 | 2,1 |
| SA4 | 3,0 | 2,9 | 2,6 | 2,3 | 2,1 | 1,9 |

Fattori di Amplificazione **SA1** (0,1s≤T≤0,5s), **SA2** (0,4s≤T≤0,8s), **SA3** (0,7s≤T≤1,1s) e **SA4** (0,5s≤T≤1,5s)

| $Vs_{30}$ (m/s) → | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SI1 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,6 |
| SI2 | 2,9 | 2,8 | 2,5 | 2,3 | 2,1 | 2,0 |
| SI3 | 3,3 | 3,1 | 2,7 | 2,4 | 2,2 | 2,0 |

Fattori di Amplificazione **SI1** (0,1s≤T≤0,5s), **SI2** (0,5s≤T≤1,0s), **SI3** (0,5s≤T≤1,5s) b)

*Figura 9.2.3 - Abachi definiti dalla Regione Emilia Romagna per il calcolo dei Fattori di Amplificazione al II livello di analisi di Microzonazione Sismica: Pianura 2 (a), Margine di tipo B (b).*

Quindi gli elaborati finali sono stati realizzati accoppiando aree con valori di FA simili, come riportato negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica 4.2 in allegato alle linee guida per la Microzonazione Sismica. In Figura 9.2.4 vengono mostrate le classi di colore assegnate per ciascun range di amplificazione ottenuto.

Per ciascuna microzona, tramite specifiche etichette sovrimposte a livello grafico, è stato altresì riportato il relativo valore numerico del Fa ottenuto per le zone stabili, mentre per le zone di attenzione per instabilità, si sono svolte approfondite verifiche tramite specifici approfondimenti di III Livello.

In linea generale nelle aree di piana alluvionale, contraddistinta da terreni stabili, data la profondità del bedrock e la natura/rigidezza dei depositi superficiali, i fattori di amplificazione (sia in accelerazione che in velocità) tendono a risultare correlati tra loro, sia nei range spettrali di media-alta frequenza (PGA, 0.1-0.5s, 0.5-1.0s, 0.7-1.1s) che a bassa frequenza (0.5-1.5s). Solamente un modesto settore più a nord, circa coincidente con le Zone 2001 e 2004, dato il maggior spessore dei depositi alluvionali e la generale minor presenza di sismostrati a maggior rigidezza sismica (intercalazioni ghiaiose), tende a presentare un maggior effetto amplificativo in corrispondenza di periodi spettrali medio-alti.

Diversamente, a seguito degli approfondimenti di III Livello, in corrispondenza delle microzone potenzialmente soggette a potenziale liquefazione, i relativi fattori di amplificazione sono stati calcolati tramiti analisi di risposta sismica locale, sostituendoli a quelli preliminarmente stimati da approccio tabellare

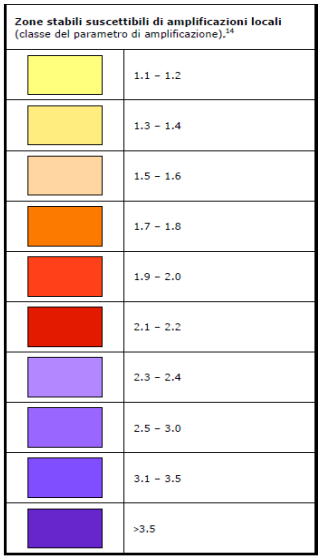



*Figura 9.2.4-Classi di colore riferite ai Fattori di Amplificazione (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. MS. Versione 4.2)*

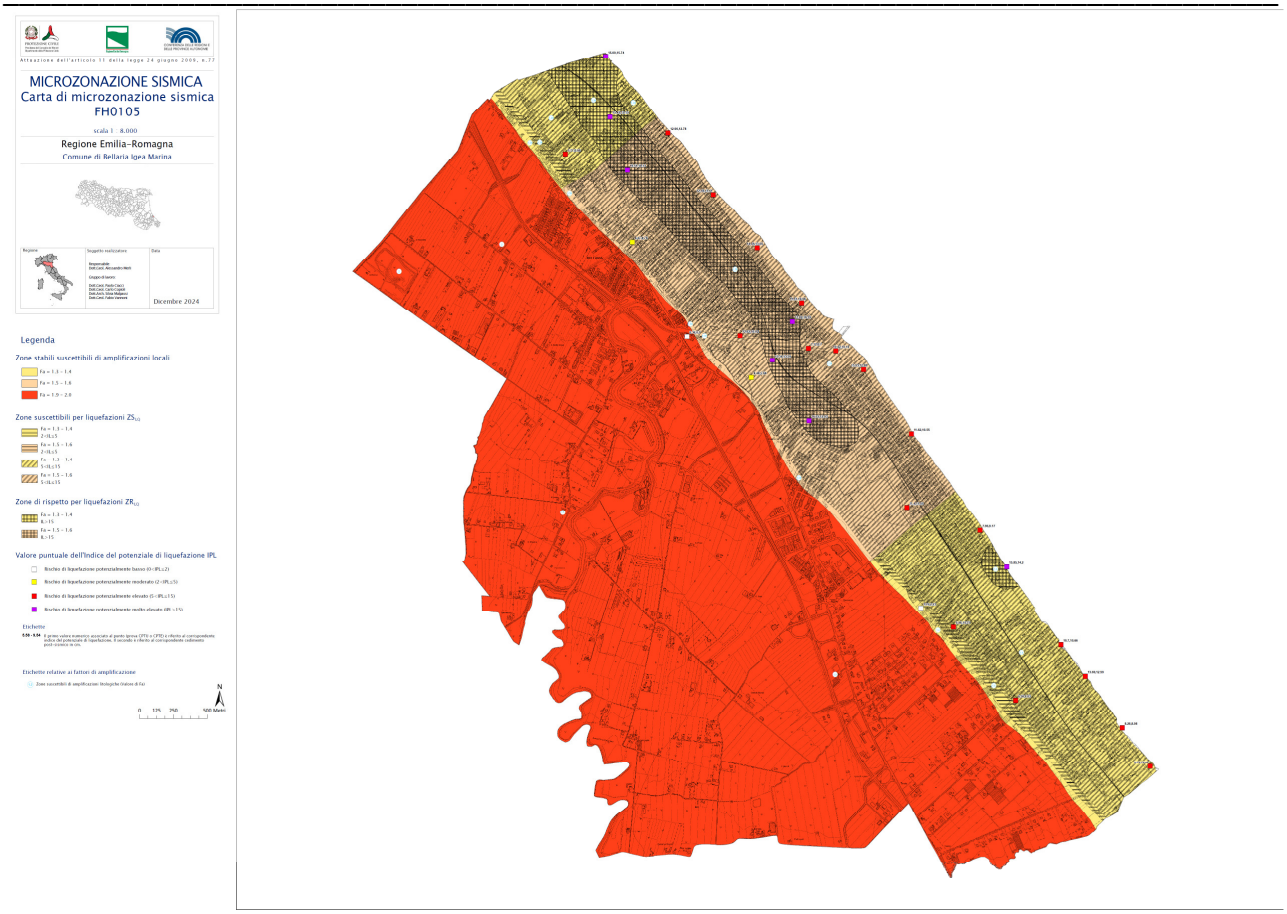



*Figura 9.2.5 - Miniatura carta di MS per periodi spettrali di risposta in velocità (Housner) tra 0.1-0.5 s (Fa_SI1).*

### *9.2.3 Fattori di Amplificazione Topografica*

Considerato che il territorio studiato si conforma secondo un assetto sub pianeggiante, in cui risultano assenti elementi morfologici locali potenzialmente comportanti fenomeni di amplificazione di tipo topografico, coerentemente a quanto previsto dalle linee guida regionali (Par. A2.2 - Del. G.R. 564/2021 R.E.R.) ed alle linee guida della protezione civile (ICMS 2008), non si è ritenuta necessaria una stima di tali fattori di amplificazione, assumendo come unico e prevalente motivo di amplificazione sismica il solo fattore stratigrafico.

### *9.2.4 Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto "$H_{SM}$"*

Per rappresentare in maniera assoluta e più realistica la pericolosità sismica del territorio, tenendo conto sia della pericolosità di base sia degli effetti di sito la Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021, richiede altresì una carta della distribuzione sul territorio dei valori di intensità sismica $H_{SM}$ (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in

valore assoluto (accelerazione in "cm/s2" o "g"), dato dal prodotto del parametro di intensità spettrale $ASI_{UHS}$ (*Acceleration Spectrum Intensity*), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi 0,1s≤T≤0,5s, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di riferimento $ASI_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file all_4_coord.kmz sviluppato a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, adottando di volta in volta quelli del nodo più vicino.

Tale parametro consente una rappresentazione assoluta della pericolosità sismica del territorio, la zonazione del territorio in termini di $H_{SM}$ permette di stabilire una reale graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee ed è quindi un elemento conoscitivo fondamentale per una più realistica valutazione del rischio sismico; in particolare l'intervallo di periodi compreso tra 0,1 s e 0,5 s, risulta di grande interesse per il governo del territorio e per la pianificazione urbanistica, in quanto è noto da vari studi che i periodi propri della maggior parte degli edifici dei centri storici, e dei centri abitati in generale, sono compresi in questo intervallo e, pertanto, consente anche eventuali valutazioni preliminari sul danneggiamento potenziale atteso.

Al proposito Naso et al., 2019 propongono una discretizzazione secondo classi di valori di $H_{SM}$ in relazione all'intensità macrosismica e danneggiamento potenziale attesi (vedi Tabella 9.2.1).

*Tabella 9.2.1 – Ipotetiche classi di intensità $H_{SM}$ in relazione ad altri fenomeni fisici (Naso et al., 2019 modificato)*

| Seismic hazard | low-very / low | moderate / low | moderate | high | very high |
|---|---|---|---|---|---|
| $H_{SM}$ (g) | ≤ 0.183 | 0.183< $H_{SM}$ ≤ 0.347 | 0.347< $H_{SM}$ ≤ 0.663 | 0.663< $H_{SM}$ ≤ 1.264 | >1.264 |
| Potential damage | none - very light | very light – moderate | moderate – heavy | heavy | very heavy |
| Instrumental intensity | ≤ VI | VII | VIII | IX | ≥ X |

Secondo gli autori infatti tale relazione empirica, correlata alla PGA ed ai fattori di amplificazione, risulta congrua con i risultati ed altri parametri sismici adottati per la classificazione sismica del territorio (Gomez Capera et al. 2007, 2015 - Faenza e Michelini, 2010 - Bramerini e Di Pasquale, 2002).

Nella rappresentazione cartografica si sono adottate le classi di pericolosità e relativa vestizione indicate dalla Regione Emilia Romagna in conformità alle recenti "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni" – versione 2.0 (2022). In tabella 9.2.2. si riportano le classi di $H_{SM}$ di riferimento:

*Tabella 9.2.2 – Classificazione di $H_{SM}$ per i 3 intervalli di periodo spettrale (LG "Amplificazioni"–versione 2.0, 2022).*

| Intervalli di periodo | Classificazione $H_{SM}$[g] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Basso ($ZS4_{SM}$) | Medio ($ZS3_{SM}$) | Alto ($ZS2_{SM}$) | Molto alto ($ZS1_{SM}$) |
| $T1_{(0.1-0.5)}$ | ≤ 0.21 | 0.22-0.54 | 0.55-0.85 | ≥ 0.86 |
| $T2_{(0.4-0.8)}$ | ≤ 0.14 | 0.15-0.34 | 0.35-0.55 | ≥ 0.56 |
| $T3_{(0.7-1.1)}$ | ≤ 0.09 | 0.10-0.22 | 0.23-0.35 | ≥ 0.36 |

**Anche per quanto riguarda la definizione di tale parametro di pericolosità sismica, i valori preliminarmente stimati per il solo $H_{SM}$, a seguito di analisi di RSL, sono stati aggiornati ed integrati sia per l'intervallo di periodo 0,1s≤T≤0,5s che $H_{0408}$, $H_{0711}$, $H_{0515}$, ovvero lo scuotimento in accelerazione (g) atteso al sito per gli intervalli di periodo 0,4s≤T≤0,8s, 0,7s≤T≤1,1s e 0,5s≤T≤1,5s.**

Di seguito si riporta uno stralcio esemplificativo della tavola relativa al parametro di scuotimento assoluto $H_{SM}$ (figura 9.2.6), alla quale si potrà fare riferimento per un maggior dettaglio.

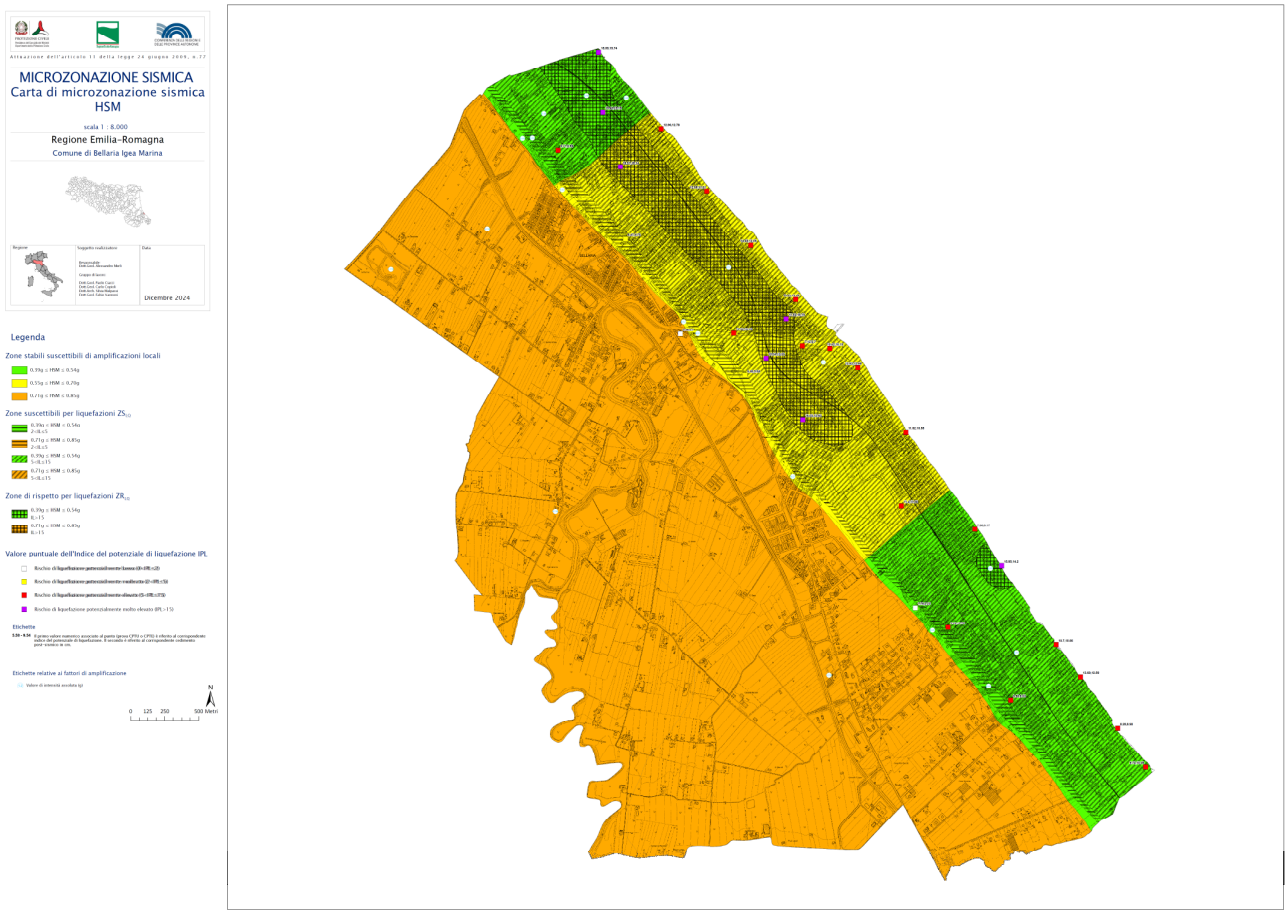



*Figura 9.2.6 – Miniatura esemplificativa della carta di scuotimento assoluto $H_{SM}$.*

## 10. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (ANALISI DI RSL E LIQUEFAZIONE)

Sulla base delle informazioni stratigrafiche profonde e superficiali, nonché sulla scorta di analisi di laboratorio geotecnico di riferimento/calibrazione e delle indagini geognostiche e geofisiche effettuate in sito, sono state realizzate una serie di analisi di RSL sulle verticali ritenute maggiormente significative. Il territorio costiero è stato quindi suddiviso in 3 microzone contraddistinte da condizioni di pericolosità sismica omogenee, in base alle quali sono state poi condotte le verifiche a liquefazione tramite metodologie semplificate sulla scorta di prove Cpte/u, adottando metodi ritenuti congrui ed adeguati alle condizioni litostratigrafiche e suggeriti dalle linee guida di settore nonché contemplati fra i metodi della Geotecnica

Sismica. Dall'esito congiunto di queste metodologie di indagine si sono quindi sviluppate le cartografie di Microzonazione Sismica di Terzo Livello di approfondimento per liquefazione.

### *10.1. Analisi di Risposta Sismica Locale*

#### *10.1.1 Modellazione numerica e codici di calcolo*

Le analisi numeriche sono state effettuate in condizioni monodimensionali tramite il codice STRATA (Kottke e Rathje, 2008), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare. Le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente a quanto fatto dal ben noto codice di calcolo SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992). La non linearità delle proprietà dinamiche, assunte indipendenti dalla frequenza, è portata in conto tramite l'approccio *lineare equivalente*. Secondo tale modello, il modulo di taglio G e il fattore di smorzamento D, che descrivono il comportamento meccanico di un materiale sotto sollecitazioni cicliche, vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale $\gamma_C$ indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidezza e smorzamento con una prima analisi si determina un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale $\gamma_{eff}$. Dalle curve $G/G_0$-$\gamma_C$ e D-$\gamma_C$, che esprimono il comportamento non lineare, si determinano quindi nuovi valori di G e D e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di G, D e $\gamma_{eff}$ viene ritenuto accettabile.
Per le analisi sui segnali/spettri in fase di input/output sono stati utilizzati i software SeismoSignal e SeismoMatch, sviluppati dalla soc. SeismoSoft, di cui si dispone della relativa licenza d'uso.

#### *10.1.2 Moto di input*

Come previsto da Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, le analisi di Risposta Sismica Locale (*RSL*) sono state condotte considerando, in ciascuna simulazione, differenti storie temporali applicate al bedrock sismico, in modo da poter investigare, quanto più possibile, il comportamento del sottosuolo e la sua suscettibilità ai fenomeni amplificativi/dissipativi quando sottoposto ad azioni sismiche differenti. In dettaglio, sono stati utilizzati i 7 segnali di riferimento indicati dalla Regione Emilia Romagna in DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*. Si tratta di **Accelerogrammi Naturali** estratti da una specifica banca dati tramite piattaforma WebGIS realizzata dall'istituto EUCENTRE: http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html

Tali accelerogrammi vengono selezionati secondo il principio di spettro compatibilità, utilizzando una procedura simile a quella adottata per la creazione di SEISM-HOME (Rota et al., 2012), considerando le prescrizioni delle NTC08 e NTC18 (ossia lo scarto tra lo spettro medio ottenuto dai 7 accelerogrammi e lo spettro di riferimento non deve superare una specifica soglia all'interno di un prefissato campo di periodi).

L'adattamento dei singoli segnali, selezionati tramite uno specifico algoritmo, avviene tramite scalatura lineare all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock, risultando quindi spettro-compatibili con lo spettro elastico in accelerazione definito per un determinato Tr (tempo di ritorno) al nodo del reticolo INGV più vicino, individuato secondo le modalità definite al precedente Capitolo 3.

La "forma generale" dei 7 accelerogrammi (la cui sigla è definita dal tempo di ritorno+codice identificativo del nodo di riferimento+suffisso_1,_2 ….es. TR475_ID18522_1) è indicativamente riportata in figura 10.1.

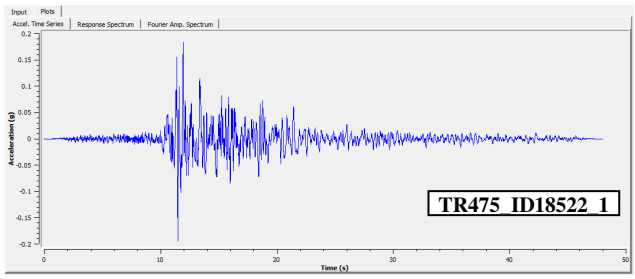
***Gli accelerogrammi, opportunamente scalati, sono stati estrapolati ai nodi di riferimento più vicini al sito di indagine, scalandoli successivamente all'accelerazione stimata al suolo rigido di tipo A tramite il documento excel "Spettri-NTCver.1.0.3" fornito dal CSLP.***

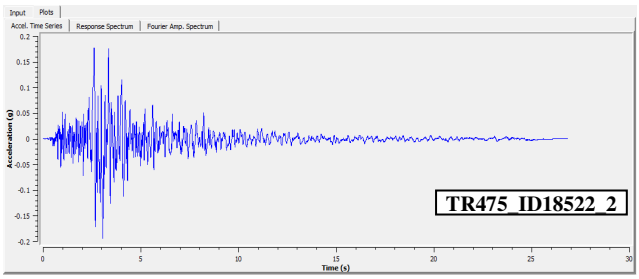
Il valore di profondità del bedrock sismico, al quale sono stati applicati in "outcrop" i 7 segnali di riferimento, è stato determinato sia sulla base dell'analisi congiunta delle diverse prove geofisiche in sito sia sulle informazioni derivanti da indagini geognostiche. A tal proposito i profili di Vs di riferimento sono sintetizzati in figura 6.2 del precedente Capitolo 6.

Il comportamento geomeccanico/geofisico di tale interfaccia è stato descritto mediante i seguenti parametri: $\delta$=22 kN/m³, 700<Vs<800 m/sec e $D_0$=0.005 (smorzamento/damping = 0.5 %). In particolare il gradiente di Vs profondo, dalla base dei profilo SCPT/DH sino al bedrock sismico, è stato definito tramite le indagini ESAC coerentemente al fit con i picchi H/V, ed il valore di Vs stimato per il bedrock sismico, sebbene lievemente inferiore alla soglia di 800 m/s, risulta comunque coerente alle esperienze di Crespellani e Simoni (2007) e Crespellani et Al. (2008), Dezi et al. (2012) per terreni fini sovraconsolidati di analoga natura.

Al di sotto del bedrock si ipotizza un modesto e progressivo incremento della velocità in onde Vs e, quindi, nel comportamento geofisico e di rigidezza dei materiali, con sostanziale assenza di significativi fenomeni amplificativi nei campi di interesse ingegneristico.

Il livello freatico medio utilizzato per la modellazione numerica risulta variabile in relazione al sito di verifica e, comunque, mediamente identificato a circa -1.0 m dal p.c. locale, quale massimo innalzamento stagionale ipotizzabile.



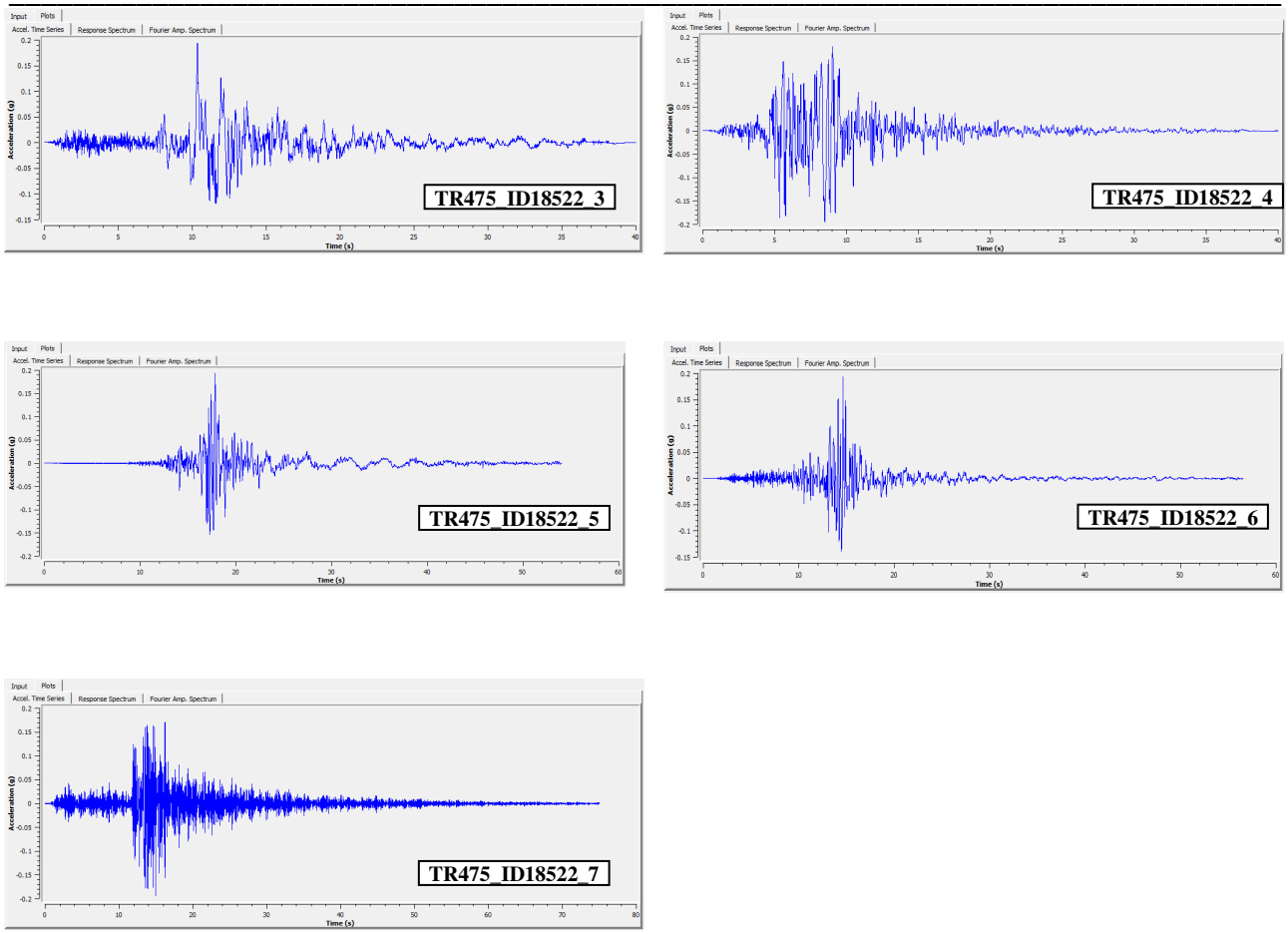



*Figura 10.1-Sismogrammi di riferimento al nodo ID18522, utilizzati come "Input" al bedrock per le analisi di RSL.*

### *10.1.3 Modello di sottosuolo e parametri dinamici*

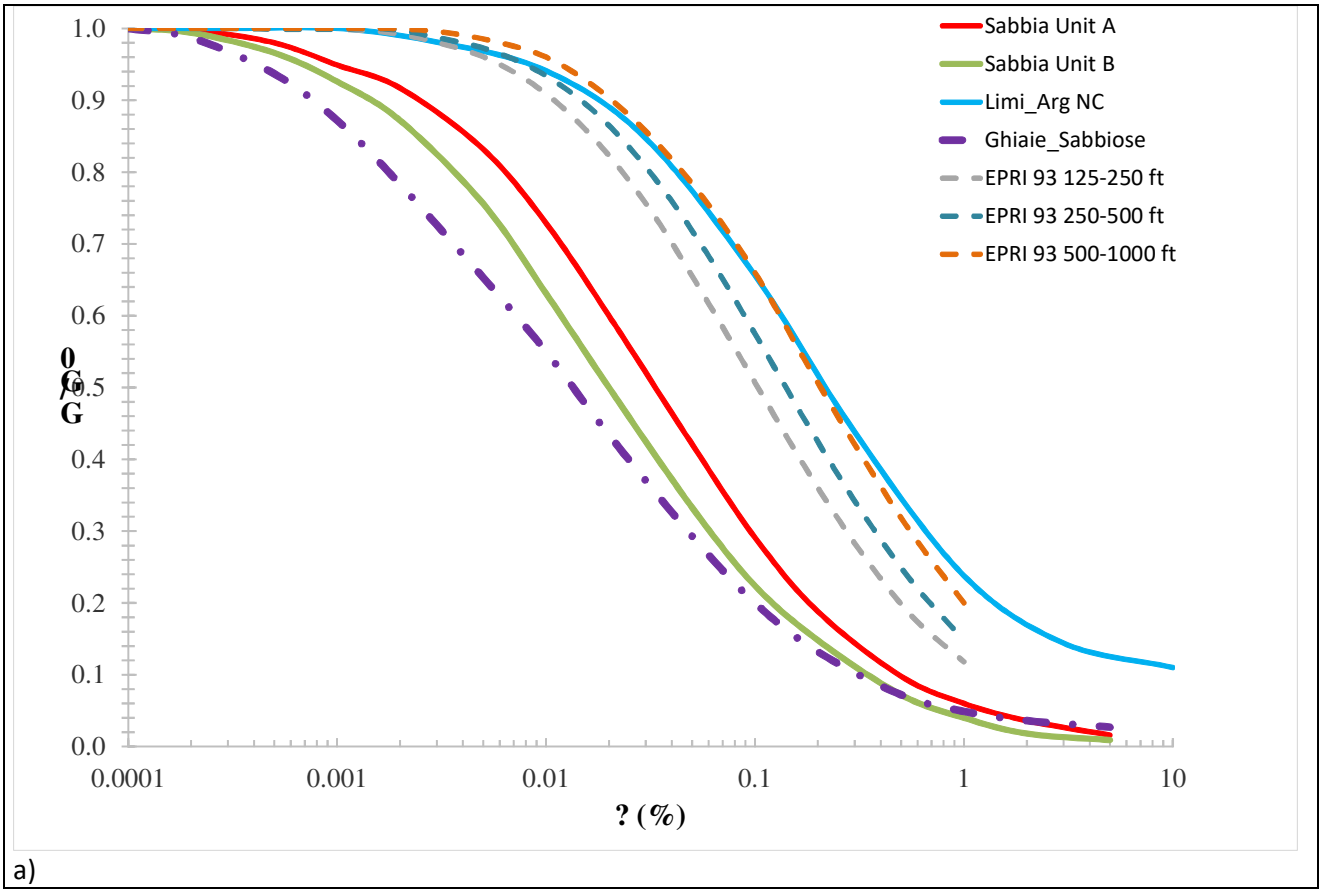
Per quanto riguarda la caratterizzazione dinamica dei terreni, al fine di ottenere curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato (G/Go) e dello smorzamento (D%) rappresentative per l'area, sono state utilizzate curve di letteratura sviluppate su campioni di alta qualità di terreno analoghi (per caratteristiche granulometriche e costitutive) (vedi figura 10.2).

In virtù di recenti esperienze di laboratorio dinamico condotte su terreni analoghi ed in zone limitrofe a quelle di studio, quali ad es. per lo studio di MS3 del Comune di Rimini (con particolare riferimento alle zone di Rimini Nord), i modelli di terreno di letteratura utilizzati a tale scopo per i terreni prevalentemente sabbiosi (Sabbie Limose) e limoso-argillosi (Limi_Arg NC) superficiali sono quelli sviluppati rispettivamente da: Seed & Idriss "Sand Mean", Seed et Al 1986 "Average" - "Lower Bound" – "Gravel", Idriss (1990) "Clay".

Invece per i sismostrati più profondi, non sondati e campionati direttamente, data la varietà tipologica dei materiali presenti (frequenti alternanze di limi-argillosi e, talora, orizzonti ghiaioso-sabbiosi), si sono utilizzate le curve di letteratura EPRI 93, formulate per terreni generici in funzione della profondità/carico litostatico (120-250 ft / 250-500 ft / 500-1000 ft).

La scelta delle curve utilizzate per ciascun sismostrato è stata condotta, quindi, sull'assunzione che il comportamento dei materiali, oltre che su parametrici litologici, varia anche in funzione di:

• Profondità/pressione di confinamento • OCR • IP • Frequenza • N. cicli



a)

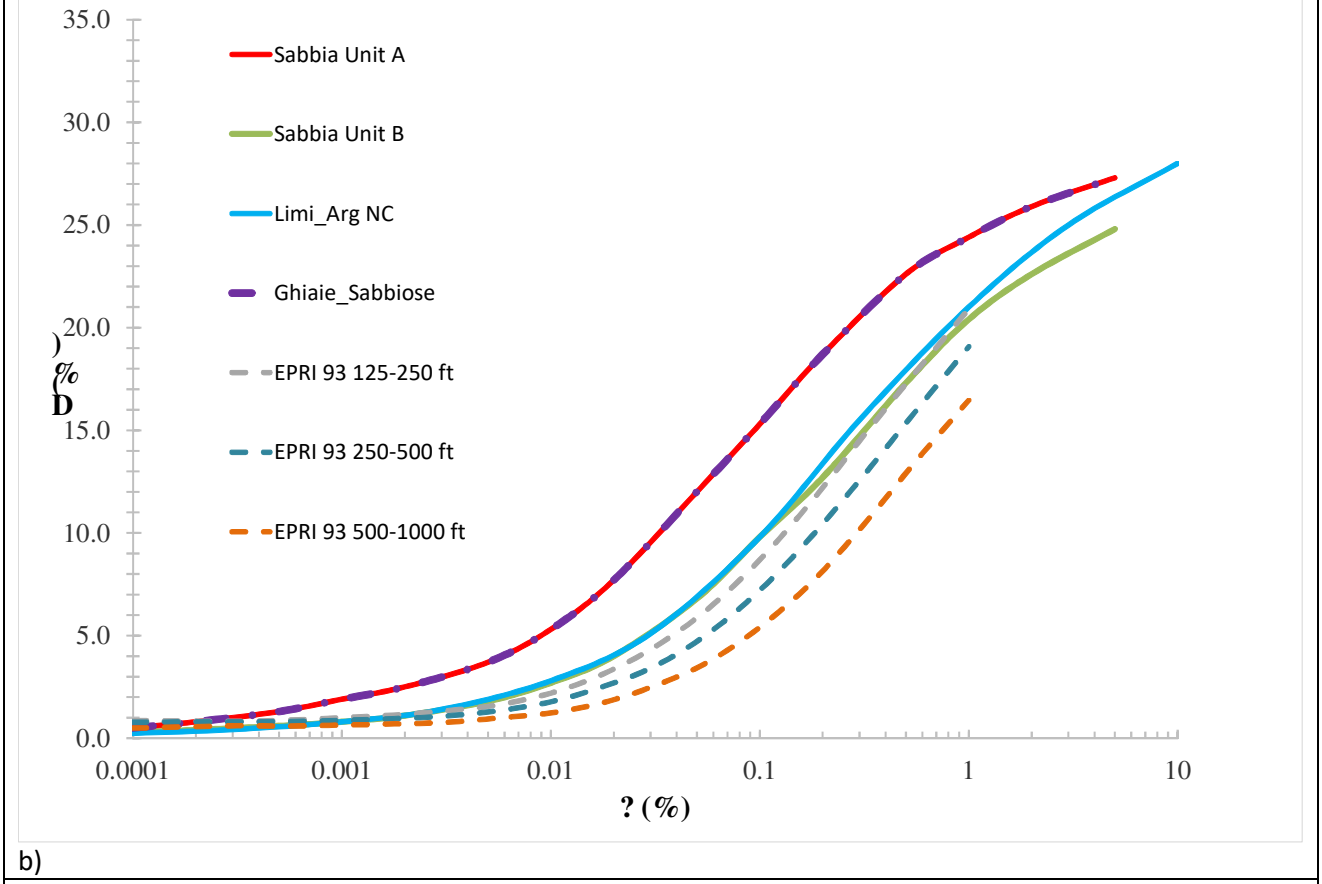



*Figura 10.2- Curve di caratterizzazione dinamica dei terreni – Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G0 a); Curve di smorzamento D% b)*

In Figura 10.2 vengono riportate le curve di decadimento/damping utilizzate per la caratterizzazione dei terreni presso le aree in studio.

In figura 10.3 si riportano invece i modelli di sottosuolo/profili stratigrafici utilizzati per le analisi di *RSL* in corrispondenza delle verticali rappresentative per le Zone BEL_01, BEL _02 e BEL _03 in cui è stata suddivisa l'area oggetto di approfondimento di analisi.

I gradienti di velocità Vs sono stati definiti attraverso le numerose prove geofisiche svolte in sito e la calibrazione con prove geognostiche e geofisiche profonde in zone vicini e terreni analoghi. In dettaglio, gli orizzonti più superficiali sono stati caratterizzati utilizzando i risultati delle prove simiche di tipo attivo e diretto (SCPT/DH) mentre, per le Vs in profondità, sono stati utilizzati i risultati delle analisi ESAC/SPAC tramite inversione congiunta con gli spettri HVSR (per maggiori dettagli capitolo 5-6).
Per il Bedrock sismico si è assunto generalmente un valore di Damping pari a 0.5 %.

| Depth (m) | Thickness (m) | Soil Type | Average Vs (m/s) |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | Sabbia Unit A | 120 |
| 1 | 2 | Sabbia Unit A | 131 |
| 3 | 2 | Sabbia Unit B | 140 |
| 5 | 3 | Sabbia Unit B | 156 |
| 8 | 3 | Limi Arg NC | 175 |
| 11 | 3 | Limi Arg NC | 195 |
| 14 | 3 | Limi Arg NC | 234 |
| 17 | 6 | Limi Arg NC | 192 |
| 23 | 7 | Limi Arg NC | 238 |
| 30 | 10 | Ghiaie sabbiose | 498 |
| 40 | 29 | EPRI 120-250 | 262 |
| 69 | 29 | EPRI 250-500 | 262 |
| 98 | 14 | Ghiaie sabbiose | 602 |
| 112 | 47 | EPRI 250-500 | 298 |
| 159 | 15 | Ghiaie sabbiose | 740 |
| 174 | 58 | EPRI 500-1000 | 450 |
| 232 | --- | Bedrock | 727 |

a)

| Depth (m) | Thickness (m) | Soil Type | Average Vs (m/s) |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | Sabbia Unit A | 130 |
| 1 | 1 | Sabbia Unit A | 140 |
| 2 | 2 | Sabbia Unit A | 150 |
| 4 | 2 | Sabbia Unit B | 152 |
| 6 | 2 | Sabbia Unit B | 195 |
| 8 | 3 | Limi Arg NC | 174 |
| 11 | 3 | Limi Arg NC | 168 |
| 14 | 3 | Limi Arg NC | 222 |
| 17 | 3 | Limi Arg NC | 185 |
| 20 | 4 | Limi Arg NC | 204 |
| 24 | 3 | Limi Arg NC | 187 |
| 27 | 3 | Limi Arg NC | 262 |
| 30 | 5 | Ghiaie sabbiose | 448 |
| 35 | 33 | EPRI 120-250 | 276 |
| 68 | 34 | EPRI 250-500 | 276 |
| 102 | 9 | Ghiaie sabbiose | 564 |
| 111 | 39 | EPRI 250-500 | 325 |
| 150 | 14 | Ghiaie sabbiose | 742 |
| 164 | 60 | EPRI 500-1000 | 548 |
| 224 | --- | Bedrock | 777 |

b)

| Depth (m) | Thickness (m) | Soil Type | Average Vs (m/s) |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | Sabbia Unit A | 130 |
| 1 | 1 | Sabbia Unit A | 140 |
| 2 | 2 | Sabbia Unit A | 160 |
| 4 | 2 | Sabbia Unit B | 140 |
| 6 | 1 | Sabbia Unit B | 175 |
| 7 | 3 | Limi Arg NC | 181 |
| 10 | 3 | Limi Arg NC | 152 |
| 13 | 5 | Limi Arg NC | 168 |
| 18 | 3 | Limi Arg NC | 212 |
| 21 | 6 | Limi Arg NC | 203 |
| 27 | 2 | Limi Arg NC | 180 |
| 29 | 1 | Limi Arg NC | 220 |
| 30 | 38 | Limi Arg NC | 234 |
| 68 | 29 | EPRI 250-500 | 276 |
| 97 | 30 | EPRI 250-500 | 298 |
| 127 | 31 | EPRI 250-500 | 298 |
| 158 | 19 | Ghiaie sabbiose | 466 |
| 177 | 25 | EPRI 500-1000 | 335 |
| 202 | 20 | Ghiaie sabbiose | 543 |
| 222 | 25 | EPRI 500-1000 | 462 |
| 247 | --- | Bedrock | 754 |

c)

*Figura 10.3- Modelli di sottosuolo adottati per le analisi di RSL nelle zone BEL_01 (a), BEL_02 (b), BEL_03 (c).*

*10.1.4 Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione*

Di seguito sono riportati risultati delle simulazioni RLS condotte in condizioni di *free field* con il software STRATA. Per ciascuna verticale di calcolo nelle figure successive vengono visualizzati:

- i profili di accelerazione (Ag/g) riferiti a ciascuno dei 7 segnali di input congiuntamente a quello medio (media aritmetica dei 7 segnali);
- la media degli spettri elastici di accelerazione con smorzamento al 5% (riferita ai 7 segnali di Input);
- lo spettro elastico medio di output in accelerazione (media aritmetica dei 7 segnali di Output);
- la funzione di trasferimento;
- dettaglio del profilo delle deformazioni di taglio massime negli ultimi 30 m da p.c. (significativo per gli aspetti di risposta di superficie e di stabilità di sito)

Inoltre, in ossequio alle direttive approvate con 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna area di verifica sono state calcolate le relative "*PGA*" al suolo libero (media dei 7 segnali) ed i fattori di amplificazione e di intensità spettrale determinati sulla base di:

- $F_{PGA}$ = *PGA/PGA0* (ove *PGA0*=$ag_{bedrock}$)
- *FA = SA/SA0*, ovvero rapporti spettrali in accelerazione fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SA1 per 0,1s≤T≤0,5s, SA2 per 0,4s≤T≤0,8s, SA3 per 0,7s≤T≤1,1s, SA4 per 0,5s≤T≤1,5s;
- *FH = SI/SI0*, ovvero rapporti spettrali in pseudovelocità (*Intensita di Housner*) fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SI1 per 0,1s≤T≤0,5s, SI2 per 0,5s≤T≤1,0s, SI3 per 0,5s≤T≤1,5s;
- Parametro di scuotimento assoluto $H_{SM}$ (g) (Naso et al., 2019), calcolato per l'intervallo di periodi 0,1s≤T≤0,5s ed $H_{0408}$, $H_{0711}$, $H_{0515}$, ovvero lo scuotimento in accelerazione (cm/s$^2$) atteso al sito per gli intervalli di periodi 0,4s≤T≤0,8s, 0,7s≤T≤1,1s e 0,5s≤T≤1,5s;

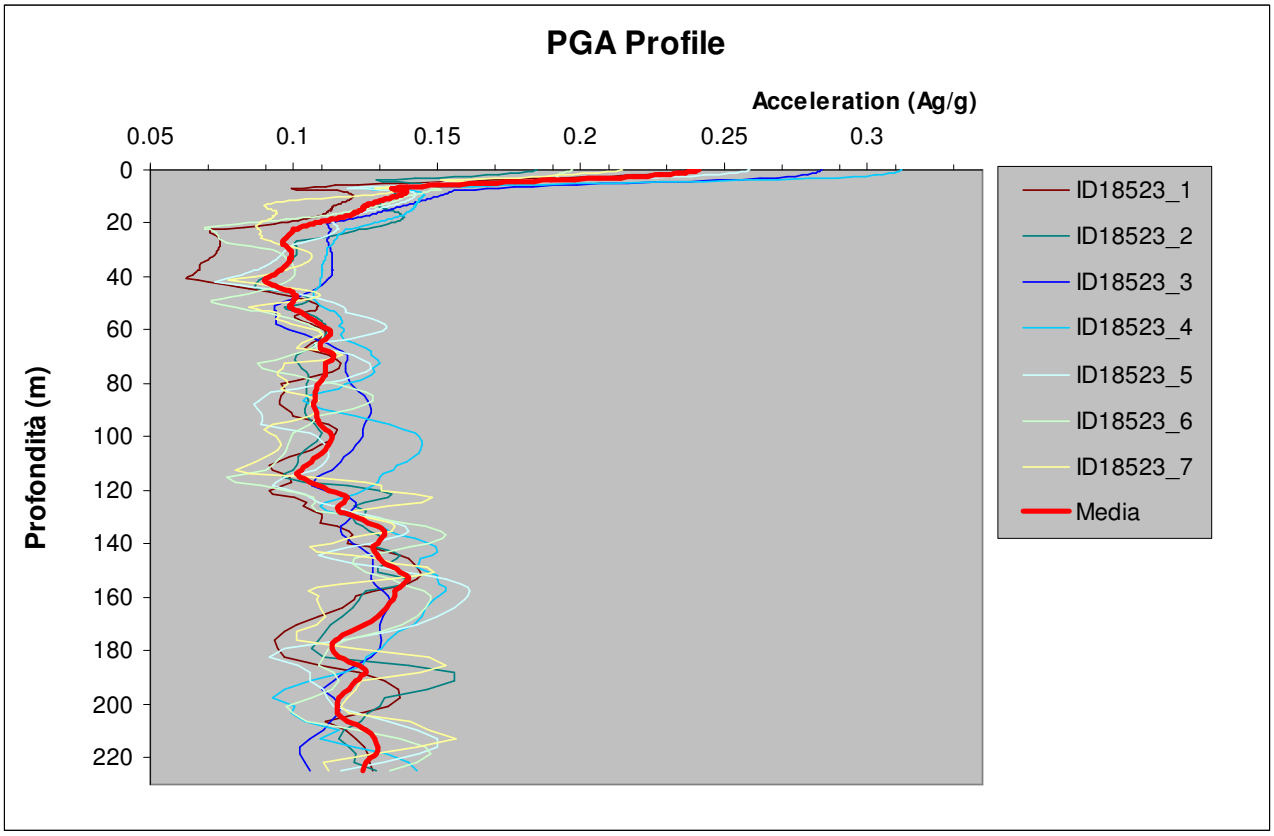
i quali vengono sinteticamente riepilogati per ciascuna zona in coda ai relativi profili e spettri.

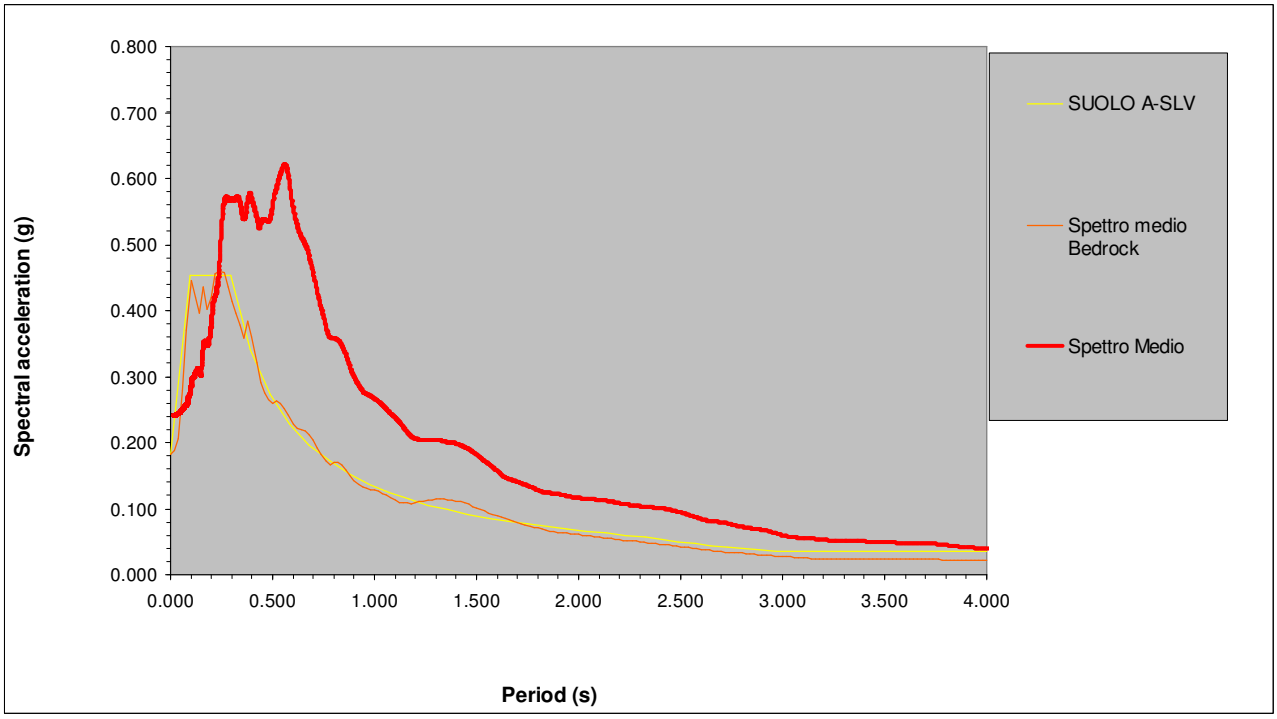
In coda a ciascuna verticale di verifica viene riportato anche il relativo valore di $V_{SH}$ / Vs30 onde consentire un eventuale confronto con i parametri tabellari proposti negli abachi regionali e/o delle ICMS.
In allegato n. 3 vengono riportati i parametri di scuotimento desumibili per ciascun accelerogramma di output, mentre in allegato n. 4 vengono riportati i dati afferenti allo spettro elastico medio di output.

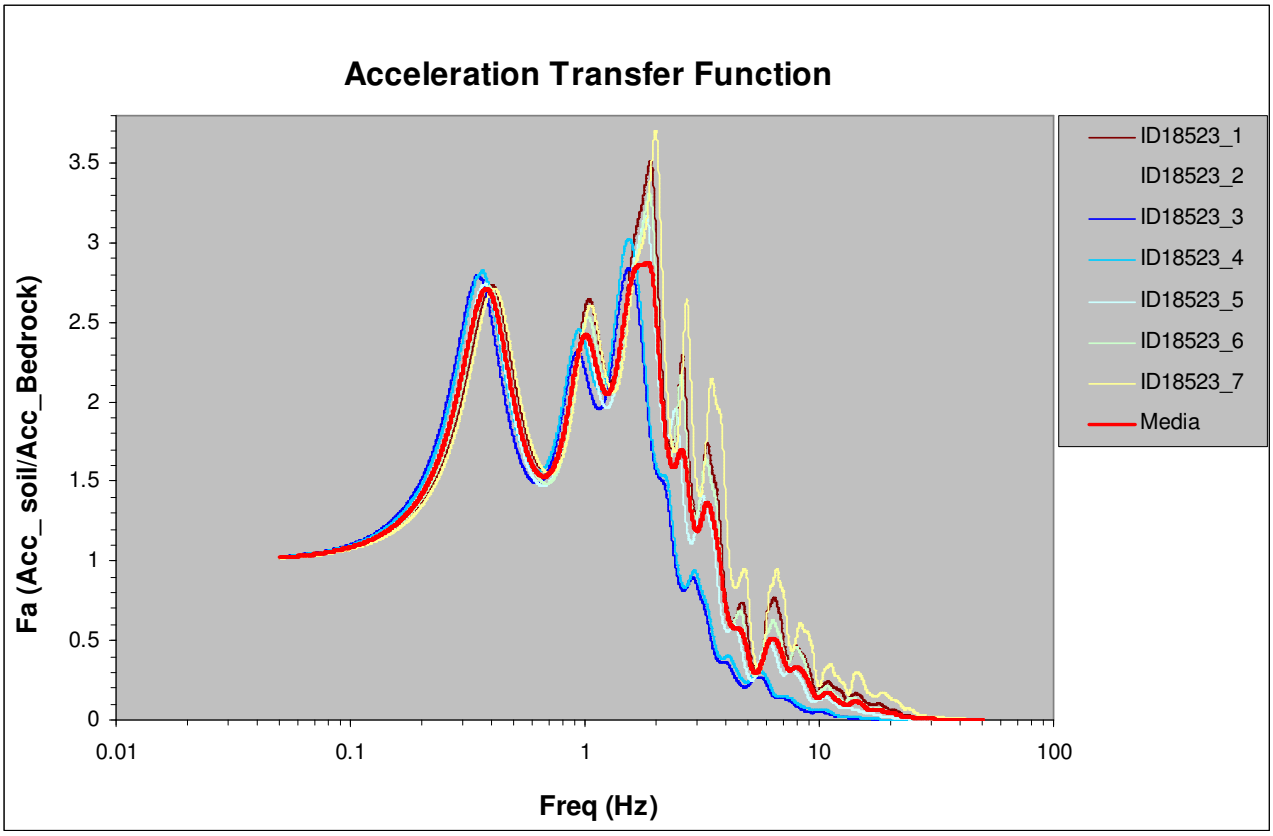
*Le aree assoggettate a III Livello di approfondimento, dato l'assetto stratigrafico rilevato, non risultano sostanzialmente interessate da situazioni amplificanti per configurazione/effetto bidimensionale e, quindi, non si ritiene necessario condurre analisi tramite metodi bidimensionali.*

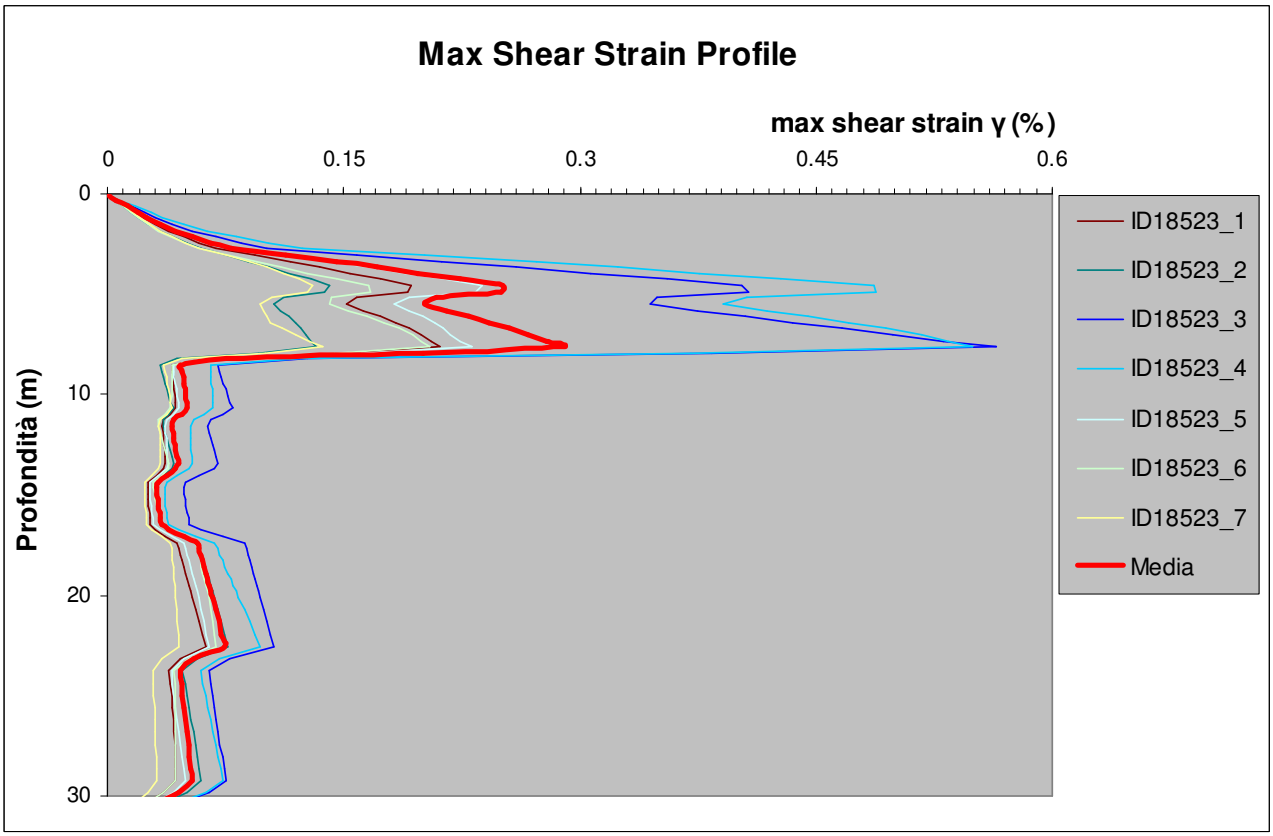
I dati numerici relativi ai singoli accelerogrammi ed agli spettri medi rappresentativi per ciascuna zona vengono inoltre forniti nell'apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dati.
Di seguito si riportano i dati di sintesi rappresentativi per ciascuna zona rappresentativa:

## *BEL_01*


PGA Profile
Acceleration (Ag/g)
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
Profondità (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
ID18523_1
ID18523_2
ID18523_3
ID18523_4
ID18523_5
ID18523_6
ID18523_7
Media


Spectral acceleration (g)
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
0.000
0.500
1.000
1.500
2.000
2.500
3.000
3.500
4.000
Period (s)
SUOLO A-SLV
Spettro medio Bedrock
Spettro Medio




**Vs30 (0-30)=184 (m/s)**

**PGA=0.241**

**$F_{PGA}$=1.321**

**Fattori SA:**

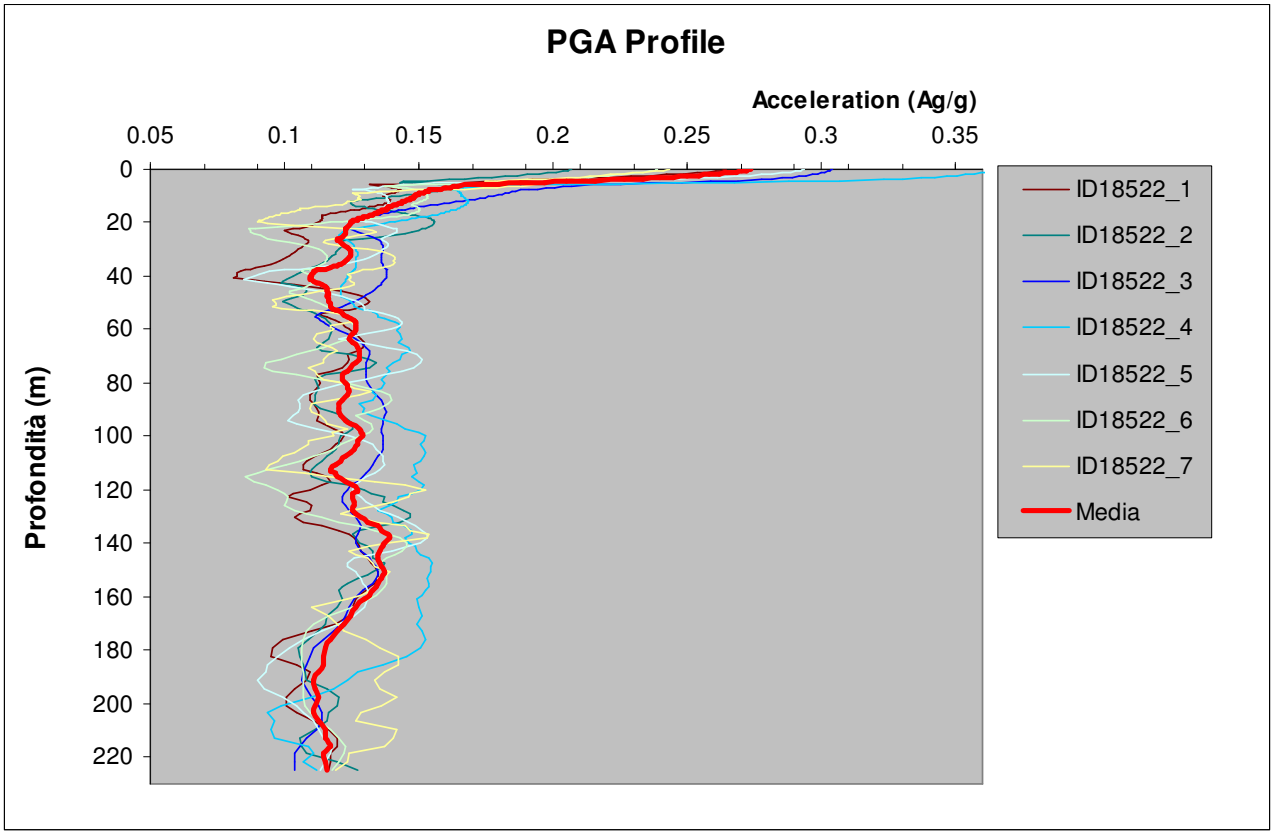
| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SA1 | 0.1-0.5 | 0.161701 | 0.193507 | 1.197 |
| INT SPETT. | SA2 | 0.4-0.8 | 0.101582 | 0.203925 | 2.007 |
| INT SPETT. | SA3 | 0.7-1.1 | 0.063651 | 0.126678 | 1.990 |
| INT SPETT. | SA4 | 0.5-1.5 | 0.155769 | 0.318422 | 2.044 |

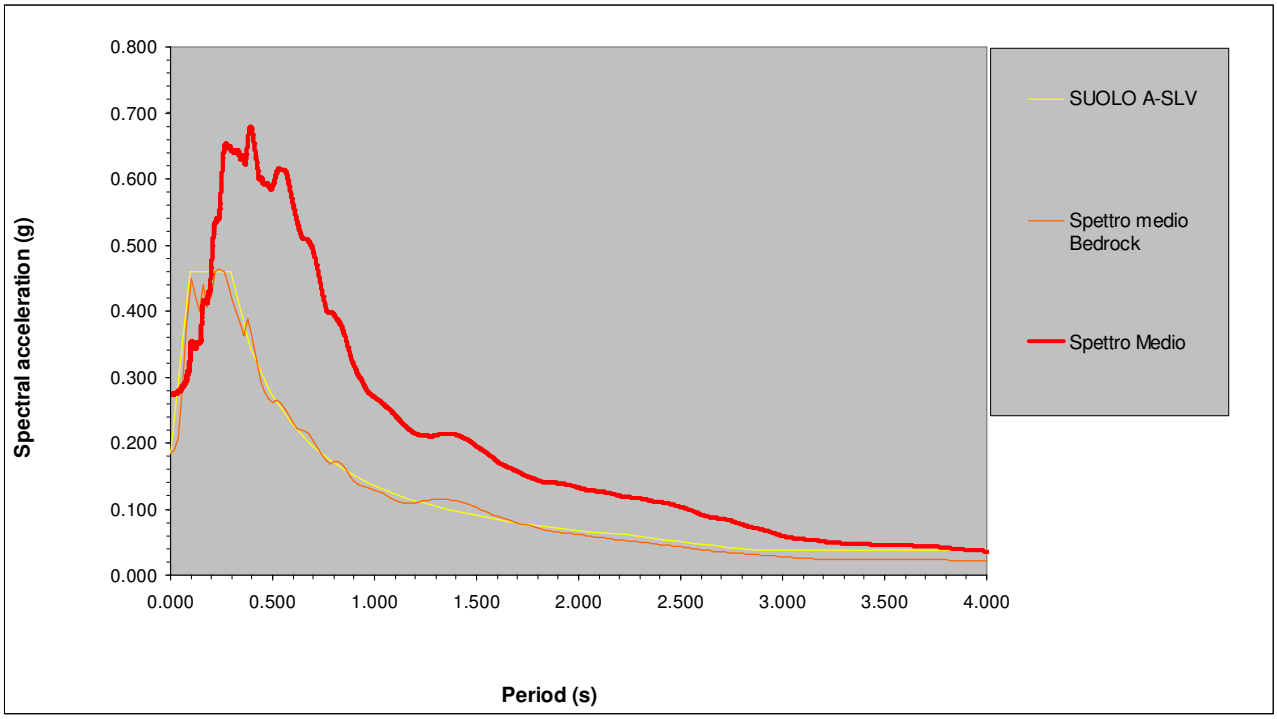
**Fattori SI:**

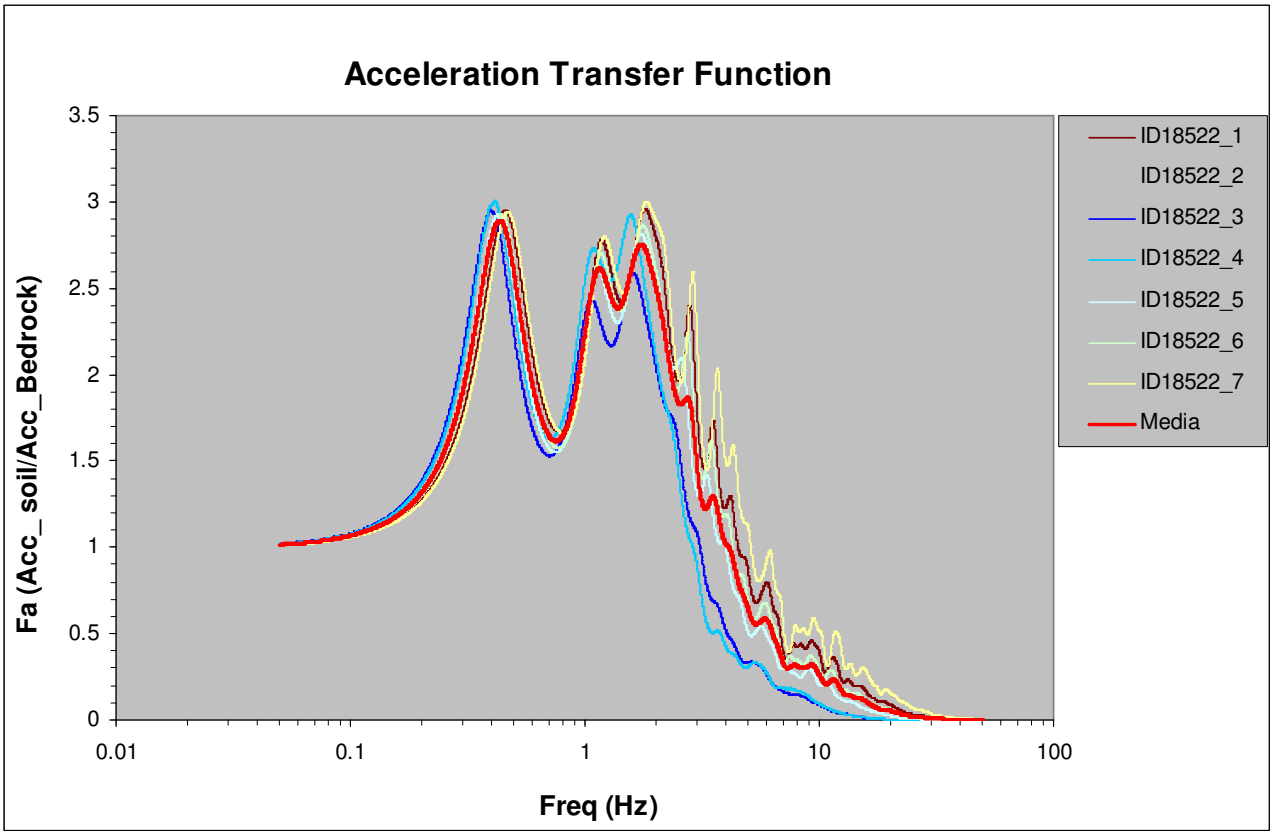
| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SI1 | 0.1-0.5 | 6.906928 | 9.699980 | 1.404 |
| INT SPETT. | SI2 | 0.5-1.0 | 10.891601 | 24.203386 | 2.222 |
| INT SPETT. | SI3 | 0.5-1.5 | 21.754763 | 44.840074 | 2.061 |

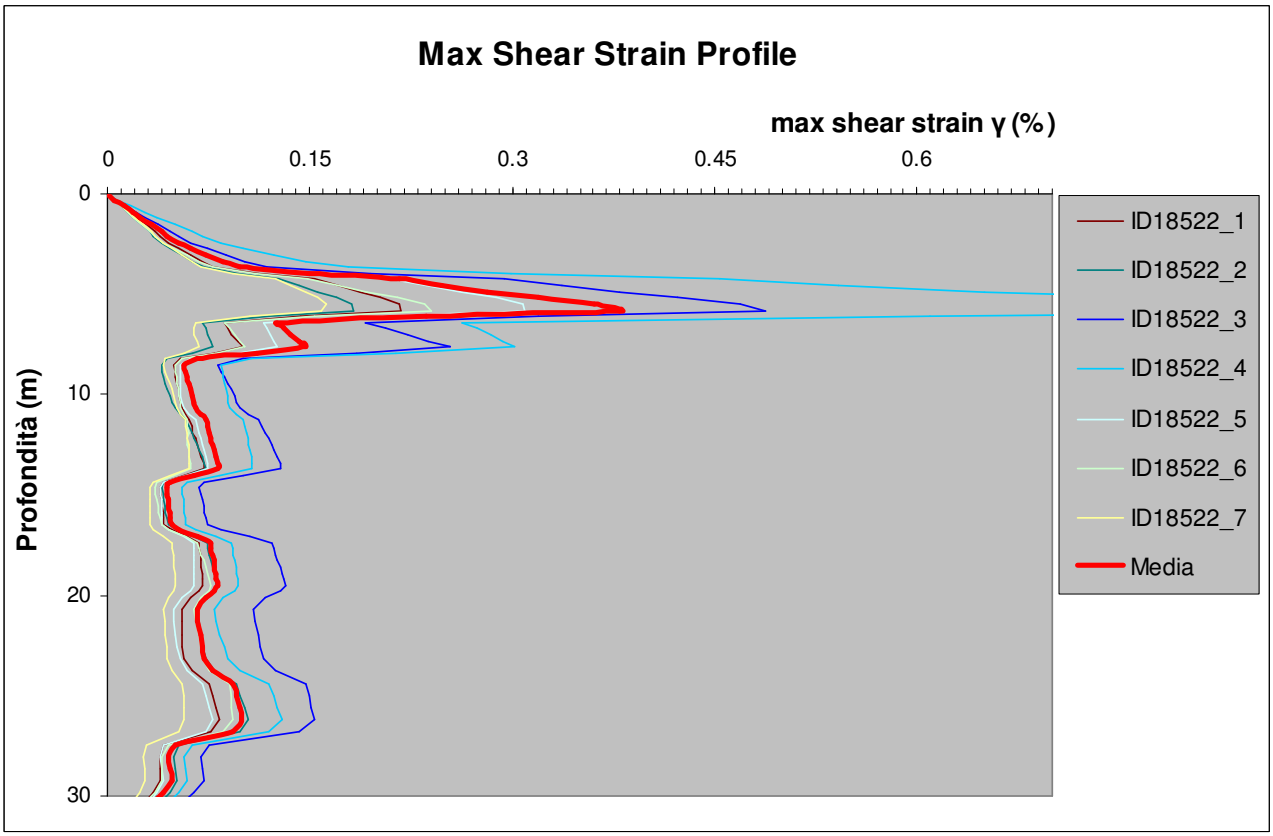
**ASIpu/ΔT= 400.891781**
**$H_{SM}$ (g) = 0.489**
**$H_{0408}$ (g) = 0.510**
**$H_{0711}$ (g) = 0.317**
**$H_{0515}$ (g) = 0.318**

## *BEL_02*


PGA Profile
Acceleration (Ag/g)
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
Profondità (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
ID18522_1
ID18522_2
ID18522_3
ID18522_4
ID18522_5
ID18522_6
ID18522_7
Media


Spectral acceleration (g)
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
0.000
0.500
1.000
1.500
2.000
2.500
3.000
3.500
4.000
Period (s)
SUOLO A-SLV
Spettro medio Bedrock
Spettro Medio




**Vs30 (0-30)=183 (m/s)**

**PGA=0.273**

**$F_{PGA}$=1.492**

**Fattori SA:**

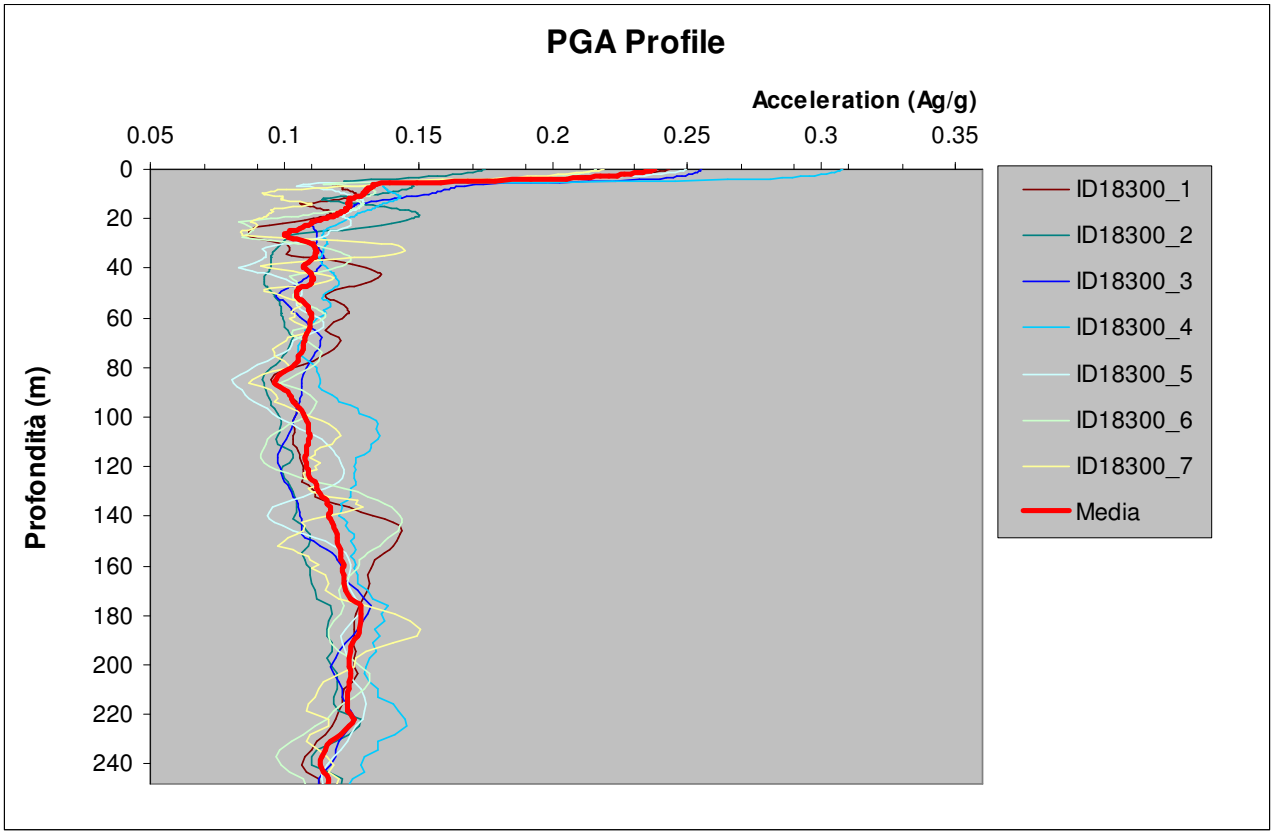
| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SA1 | 0.1-0.5 | 0.162999 | 0.222868 | 1.367 |
| INT SPETT. | SA2 | 0.4-0.8 | 0.102400 | 0.215766 | 2.107 |
| INT SPETT. | SA3 | 0.7-1.1 | 0.064162 | 0.134043 | 2.089 |
| INT SPETT. | SA4 | 0.5-1.5 | 0.157021 | 0.331479 | 2.111 |

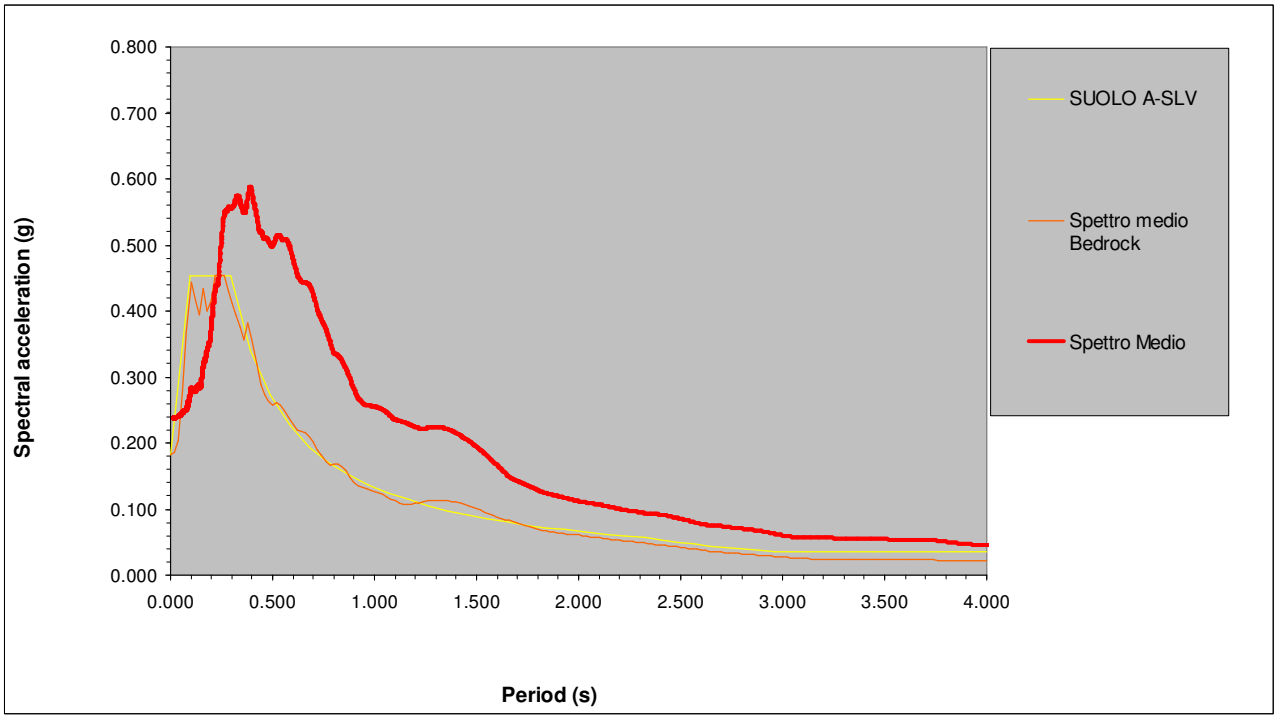
**Fattori SI:**

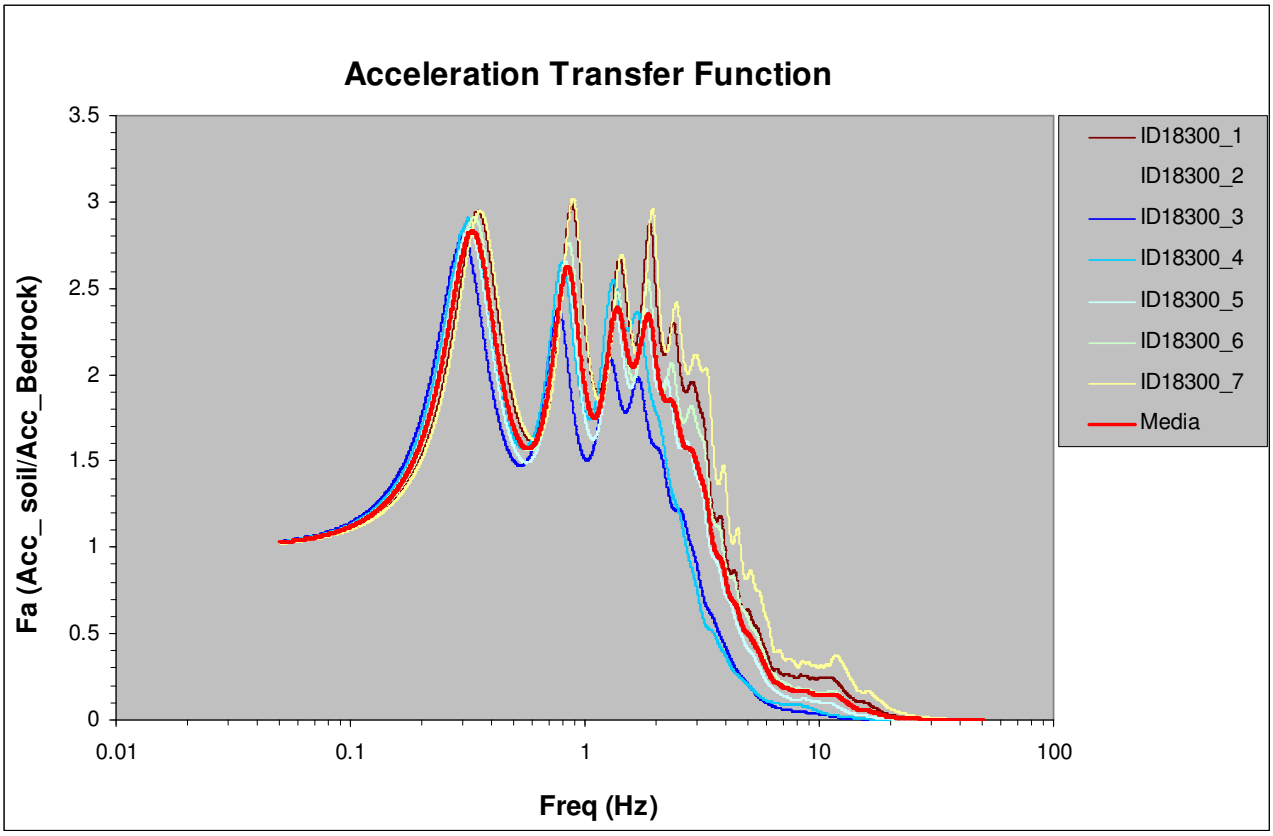
| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SI1 | 0.1-0.5 | 6.962391 | 11.100799 | 1.594 |
| INT SPETT. | SI2 | 0.5-1.0 | 10.979299 | 25.314804 | 2.306 |
| INT SPETT. | SI3 | 0.5-1.5 | 21.929450 | 46.837207 | 2.136 |

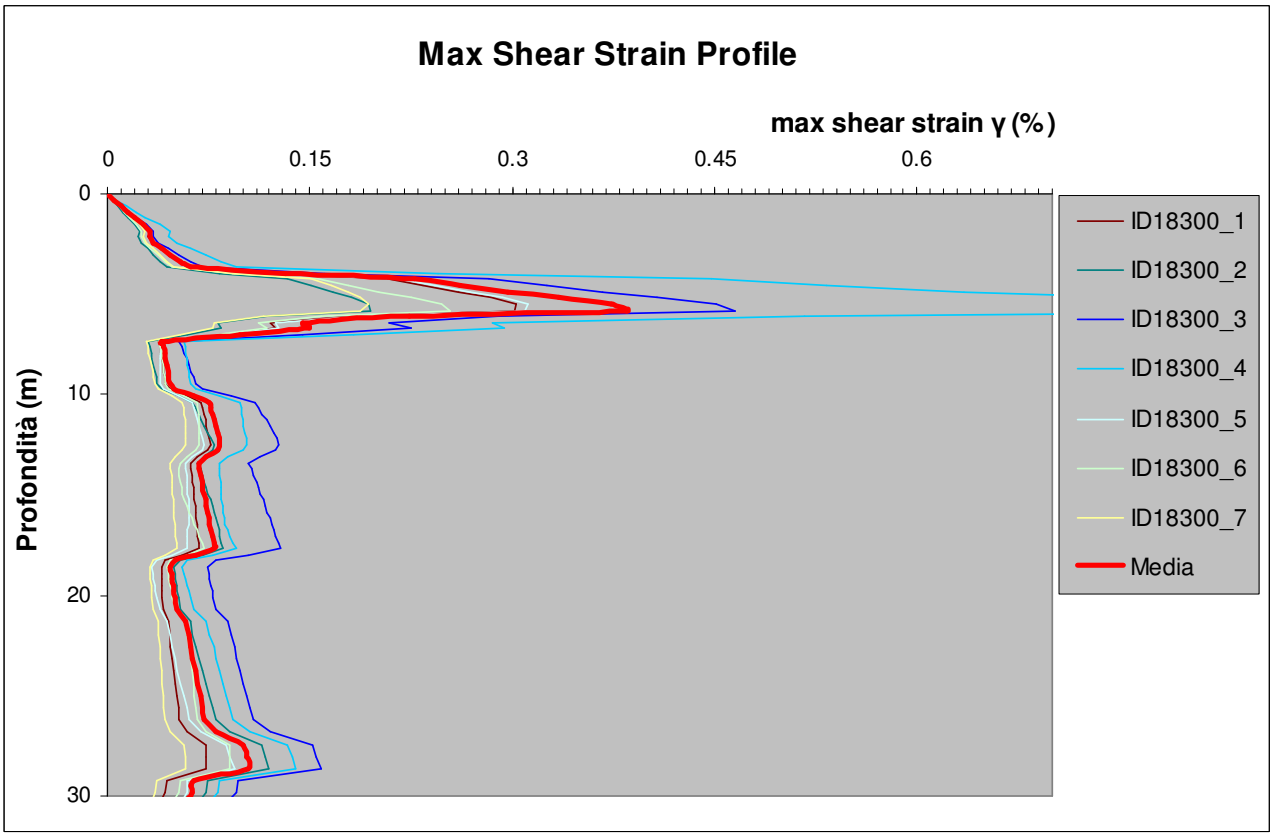
| | |
|---|---|
| **ASIpu/ΔT=** | **405.851962** |
| **$H_{SM}$ (g) =** | **0.566** |
| **$H_{0408}$ (g) =** | **0.539** |
| **$H_{0711}$ (g) =** | **0.335** |
| **$H_{0515}$ (g) =** | **0.331** |

## *BEL_03*


PGA Profile
Acceleration (Ag/g)
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
Profondità (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
ID18300_1
ID18300_2
ID18300_3
ID18300_4
ID18300_5
ID18300_6
ID18300_7
Media


Spectral acceleration (g)
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
0.000
0.500
1.000
1.500
2.000
2.500
3.000
3.500
4.000
Period (s)
SUOLO A-SLV
Spettro medio Bedrock
Spettro Medio




**Vs30 (0-30)=174 (m/s)**

**PGA=0.238**

**$F_{PGA}$=1.316**

**Fattori SA:**

| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SA1 | 0.1-0.5 | 0.160550 | 0.189702 | 1.182 |
| INT SPETT. | SA2 | 0.4-0.8 | 0.100859 | 0.185551 | 1.840 |
| INT SPETT. | SA3 | 0.7-1.1 | 0.063198 | 0.120835 | 1.912 |
| INT SPETT. | SA4 | 0.5-1.5 | 0.154660 | 0.303776 | 1.964 |

**Fattori SI:**

| | | Periodo(s) | Bedrock | Soil | FA |
|---|---|---|---|---|---|
| INT SPETT. | SI1 | 0.1-0.5 | 6.857756 | 9.526131 | 1.389 |
| INT SPETT. | SI2 | 0.5-1.0 | 10.814060 | 22.067750 | 2.041 |
| INT SPETT. | SI3 | 0.5-1.5 | 21.599884 | 43.890751 | 2.032 |

| | |
|---|---|
| **ASIpu/ΔT=** | **399.058537** |
| **$H_{SM}$ (g) =** | **0.481** |
| **$H_{0408}$ (g) =** | **0.464** |
| **$H_{0711}$ (g) =** | **0.302** |
| **$H_{0515}$ (g) =** | **0.304** |

Il trend osservabile è un graduale approfondimento del bedrock sismico procedendo da SE verso NW così come un generale decremento di rigidezza sismica degli orizzonti alluvionali e marini nelle prime decine di m superficiali. In particolare le zone BEL_01 e BEL_02 sono caratterizzate da una più cospicua presenza di orizzonti ghiaiosi e dai relativi contrasti di impedenza sismica; in corrispondenza di questi ultimi, soprattutto quelli più superficiali, talora si evidenzia lo sviluppo di deformazioni di taglio significative, potenzialmente determinanti condizioni di non linearità.

I livelli deformativi (max shear strain) stimabili in corrispondenza degli orizzonti potenzialmente liquefacibili, tramite i moti di input e condizioni al contorno adottati, sovente superano le soglie utili a determinare un significativo incremento delle sovrappressioni sismicamente indotte nelle sabbie sature; pertanto tali valori risultano pari o superiori ai limiti di generale applicabilità dei metodi di analisi EQL, suggerendo all'occorrenza l'opportunità di un approccio anche tramite metodi di analisi non lineare, generalmente più adeguati nel campo delle medie-grandi deformazioni.

## *10.2. Stabilità di Sito – Potenziale di liquefazione*

### *10.2.1 Generalità e valutazioni geologico-tecniche*

In prima battuta è quanto mai opportuno ricordare le evidenze storiche riguardo la periodica occorrenza di tali fenomeni lungo le coste romagnole in occasione dei maggiori terremoti storici conosciuti.

Le evidenze storiche in termini di effetti sul territorio vengono riportate nel recente catalogo di Galli P. (2000) e nel web-gis *Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti dai forti Terremoti (CEDIT) - CERI* dell'Università "Sapienza" di Roma, che censisce gli effetti indotti sul terreno da terremoti storici verificatisi in un arco temporale che va dall'anno 1000 d.C. al 2016; in figura 10.4, viene riportato uno stralcio del catalogo di Galli (2000) raffigurante gli eventi principali geolocalizzati lungo la costa romagnola, con particolare riferimento agli eventi della Provincia Riminese e nei tratti costieri limitrofi.

| Epicentral parameters of the seismic events | | | | | | | | Sites with indication of liquefaction | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ref. | Date | Latitude | Longitude | $I_0$ | $M_e$ | $M_s$ | Area | Site[a] | Latitude | Longitude | $d$ (km) | $I_s$ | Type |
| 136 | 1786.12.25 | 43.980 | 12.580 | 8.0 | 5.59 | 5.5 | Rimini | Rimini | 44 04 | 12 34 | 10 | 8.0 | A1 E |
| 177 | 1875.03.17 | 44.070 | 12.550 | 8.0 | 5.72 | 5.2 | Rimini | Cervia | 44 16 | 12 21 | 27 | 7.0 | A1 |
| 178 | 1875.03.17 | 44.070 | 12.550 | 8.0 | 5.72 | 5.2 | Rimini | Cesenatico | 44 12 | 12 24 | 19 | 8.0 | A1–2 |
| 230 | 1916.05.17 | 44.000 | 12.630 | 8.0 | 5.72 | 6 | Rimini area | Rimini | 44 03 | 12 34 | 8 | 8.0 | A1 |
| 231 | 1916.08.16 | 43.970 | 12.670 | 8.0 | 5.59 | 6.1 | Rimini urea | Cattolica | 43 58 | 12 44 | 5 | 8.0 | A1–2 A4–5 |
| 232 | 1916.08.16 | 43.970 | 12.670 | 8.0 | 5.59 | 6.0 | Rimini area | Ghetto delle Fontanelle | 43 59 | 12 40 | 2 | 8.0 | A4–5 |
| 233 | 1916.08.16 | 43.970 | 12.670 | 8.0 | 5.59 | 6.0 | Rimini urea | Pesaro | 43 55 | 12 55 | 20 | 8.0 | A1 |
| 234 | 1916.08.16 | 43.970 | 12.670 | 8.0 | 5.59 | 6.0 | Rimini urea | Riccione | 44 01 | 12 39 | 5 | 8.0 | A1 A4 |
| 235 | 1916.08.16 | 43.970 | 12.670 | 8.0 | 5.59 | 6.0 | Rimini area | Rimini | 44 04 | 12 34 | 14 | 8.0 | C |

- A = ground fissuring and related phenomena
  - A1 = only ground fissures
  - A2 = water emission
  - A3 = mud, sand and gravel venting
  - A4 = mixed water and sand venting (sand boils)
  - A5 = mud volcanoes
- B = surface deformation
  - B1 = local settlement
  - B2 = local swelling
- C = differential settlement of building
- D = liquefaction evidence s.l. or without description.

*Figura 10.4 – Stralcio da "New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction" – Table 4, Galli, 2000.*

Una prima indicazione in merito alla suscettibilità a liquefazione in condizioni sismiche dei terreni si può ottenere attraverso la sovrapposizione delle curve di distribuzione granulometrica dei campioni già utilizzati per la MS di livello I-II prelevati con i campi di potenziale liquefacibilità proposti da Tsuchida H. (1970). In tal caso essi ricadono entro i campi di potenziale suscettibilità per terreni Coefficiente di Uniformità Uc < 3.5 e Uc >3.5 (vedi figura 4.5).

Dai dati della campagna geognostica risulta che lo spessore del corpo sedimentario sabbioso costiero (rappresentato in loco dalle Unità A e B), costituito da sabbie prevalenti e alternanze di livelli sabbiosi con sottili orizzonti limosi ed argillosi ma a comportamento generale prettamente incoerente, risulta variabile fra i valori di circa 5.5-8.5 mt (eccetto le zone di chiusura contro la paleo falesia in cui va assottigliandosi per chiudersi a becco di flauto); tuttavia alla base del cuneo sabbioso, talora, sono presenti orizzonti metrici di sabbie limose alluvionali e/o ghiaietto di barra di foce, determinando un'ulteriore spessore locale di materiali incoerenti potenzialmente liquefacibili. Data l'estensione dell'area in studio, si sono adottate le azioni

sismiche derivate dalla suddivisione in 3 settori omogenei in relazione ai nodi INGV di riferimento, agli assetti geologici e stratigrafici adottati per la modellazione di RSL.

In un intorno del T. Uso e del suo tratto di foce si apprezza una parziale alterazione dell'assetto stratigrafico costiero, con sovrapposizione di processi erosivi/deposizionali sia fluviali che marini.

La stima del potenziale di liquefazione può essere effettuata in condizioni "free-field" con i "metodi semplificati" indicati in Allegato A3 della DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021* e, a tal fine, per ogni verticale si è utilizzato il picco di accelerazione massima in superficie $a_{max}$ (*PGA*) desunto, per ciascuna zona di RSL, mediante analisi della risposta locale sotto l'azione sismica di riferimento.

Per il caso in esame risulta possibile analizzare la potenziale liquefacibilità dei terreni attraverso metodi basati sullo stato tensionale in cui il fattore di sicurezza alla liquefazione viene definito tramite il rapporto tra resistenza ciclica *CRR* e azione simica di progetto *CSR* (Cyclic Stress Ratio) per cui *FS=CRR/CSR*; in particolare ci si può avvalere di metodologie di tipo storico – empirico fra cui quelle basate su prove CPT come raccomandato nelle Linee Guida AGI 2005 e ICMS 2008.

Per quanto riguarda la scelta del metodo si è adottata la formulazione di Robertson 2009-2015 (*R09*), ritenuta particolarmente idonea e riconosciuta per affidabilità e diffusione a livello internazionale e nel mondo accademico; in particolare la stima in continuo del contenuto in fine % *FC* (Robertson & Fear, 1995) risulta ben calibrata sulla situazione litostratigrafica e granulometrica dei sedimenti in posto. Tale metodo, in assenza di puntuali e diffuse prove di laboratorio, consente una stima della resistenza ciclica di riferimento sulla scorta della resistenza alla punta in funzione del parametro di comportamento del terreno *Ic* (soil behavior index), in quanto il valore di resistenza ciclica finale dei terreni è influenzato da diversi fattori genetici e costitutivi oltre al solo "contenuto in fine apparente".

Fra gli altri metodi altrettanto riconosciuti quali ad es. quello proposto Idriss-Boulanger (2014), nonostante abbia comportato un ulteriore aggiornamento di alcuni parametri e delle case-history di riferimento, a parere dello scrivente risulta molto sensibile alle valutazioni/stime del contenuto in fine di tali terreni e, pertanto, il modello di interpretazione dell'*FC,* insito nel metodo, richiederebbe un'approfondita e specifica calibrazione basata su di un vasta base di dati di laboratorio.

In tal senso per l'analisi di tipo areale ed in base ai riscontri ottenuti da studi pregressi in aree limitrofe del medesimo ambito depsizionale, al grado di conoscenza della stratigrafia, di affidabilità delle prove e dei dati utilizzati, si è scelto quindi di utilizzare il metodo di Robertson 2009-2015 (*R09*) secondo un adeguato fattore di sicurezza di riferimento FS (FS=CRR/CSR), al fine di garantire lo stesso livello di confidenza, in termini probabilistici, degli altri metodi CPT maggiormente diffusi in letteratura (*IB2014*, *IB08*, *Moss 2006*), adottando una curva limite che discrimini gli ambiti di liquefazione/non liquefazione secondo un livello di confidenza minimo pari all'85% (curva con probabilità di liquefazione PL=15%).

A attraverso la formulazione di Ku et al. (2012), per cui $P_L = 1 - \Phi\left[\frac{0.102 + \ln(F_s)}{0.276}\right]$ (con Φ = distribuzione standard normale), si evince come l'adozione di ***FS=1.2*** garantisca il livello di confidenza richiesto (*PL*=15%).

Inoltre secondo un approccio prettamente deterministico, tale soglia di *FS=1.2* viene altresì raccomandata dall'autore stesso per valutazioni inerenti opere ordinarie, in quanto il metodo mantiene insito, comunque, un certo grado di conservatività (comunicazione personale).

L'adozione dei metodi semplificati di verifica a liquefazione, in relazione alle condizioni di pericolosità sismica generale ed alla stima dei carichi ciclici ipotizzabili, richiede l'adozione di una *Mw* (magnitudo momento) di riferimento che, per il caso in esame, viene assunta pari a ***Mw=6.16***.

La verifica di calcolo, riportata in allegato n. 5, è stata effettuata come da normativa attraverso l'utilizzo del software CLiq vers. 2.3.1.15 della software house Geologismiki, utilizzando le prove Cpte/u identificate nella "Carta delle Indagini" e riportate nel database, la cui stratigrafia è stata discretizzata mediando i valori ottenibili secondo orizzonti di 5 cm.

Il metodo *R09* è basato su un proprio fattore caratteristico di scalatura della magnitudo (*MSF*) e specifici coefficienti riduttivi (*Rd-Kα-Kσ*) atti a determinare i valori di *CRR* (cyclic resistance ratio) e *CSR* (cyclic stress ratio) necessari a definirne il *FS* (fattore di sicurezza) per ciascuno strato rispetto ad una soglia limite di riferimento prefissata. Essendo uno studio di tipo areale ed in assenza di specifiche indicazioni progettuali il calcolo è stato effettuato assumendo condizioni di free-field ed un livello di falda ipotizzabile in condizioni di massimo innalzamento medio stagionale.

Dall'analisi congiunta degli accelerogrammi utilizzati per le analisi di *RSL*, oltre alla *PGA* media attesa a suolo libero è stato definito anche il profilo medio di *CSR*. Tuttavia ai fini dell'azione sismica, trattandosi di ampie aree di studio nonché in riferimento alle indicazioni contenute nel NASEM Report-2016, si è optato per l'utilizzo della sola *PGA* ricavata per ciascuna delle zone studiate, per cui i rispettivi valori (arrotondati), muovendosi da SE a NW, risultano pari a:

| ZONE RSL | PGA (ag/g) |
|---|---|
| BEL_01 | 0.241 |
| BEL_02 | 0.273 |
| BEL_03 | 0.238 |

Il piano/quota di riferimento utilizzato per le verifiche è pari al piano campagna attuale (p.c.).

Come indicatore di rischio complessivo, oltre al valore di *FS* per ciascun singolo strato, viene stimato anche il potenziale di liquefazione "*IPL*" o *"IL"* lungo la colonna stratigrafica fino alle profondità sondate secondo il metodo di Iwasaki et Al. 1982, come recentemente rivisto ed aggiornato da Sonmez (2003), integrando in modo pesato il potenziale di liquefazione di ciascuno strato su tutto il profilo stratigrafico indagato e per cui:

IWASAKI 1982

| | |
|---|---|
| IPL=0 | Rischio liquefazione molto basso |
| 0<IPL≤5 | Rischio liquefazione basso |
| 5<IPL≤15 | Rischio liquefazione alto |
| IPL>15 | Rischio liquefazione molto alto |

SONMEZ 2003

| | |
|---|---|
| IPL=0 | Rischio liquefazione molto basso |
| 0<IPL≤2 | Rischio liquefazione basso |
| 2<IPL≤5 | Rischio liquefazione moderato |
| 5<IPL≤15 | Rischio liquefazione alto |
| IPL>15 | Rischio liquefazione molto alto |

In funzione del *FS* calcolato sono stati determinati, altresì, le deformazioni massime (*γmax - LDI*) ed i cedimenti attesi (*εv - ΔSi*) nei terreni sia in falda che fuori falda (Zhang, 2002, Priebe, 1998), siano essi incoerenti che coesivi (rispettivamente per deformazione volumetrica/riaddensamento e riconsolidazione; Robertson metodo "All Soil, 2009").

In allegato n. 5-6 viene altresì illustrata l'entità dei cedimenti post-sismici attesi Δ*S*, cumulativa sia per terreni incoerenti che coesivi i quali, all'interno di ciascuna zona, presentano una modesta variabilità areale.

A titolo di riferimento Ishihara e Yoshimine (1992), in relazione ai cedimenti stimati ed al grado di danneggiamento/effetti attesi al suolo, identificano tre ambiti di pericolosità per cui:

| Cedimento (cm) | Grado/severità di danneggiamento |
|---|---|
| $\Delta S < 10$ | Assente - Lieve |
| $10 < \Delta S < 30$ | Medio |
| $\Delta S > 30$ | Esteso - Severo |

Inoltre, in relazione al rapporto di spessore fra strati liquefacibili/non liquefacibili ) e la relativa profondità, altri autori (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995) schematizzano la possibilità di propagazione verso l'alto e/o di avere manifestazioni superficiali in funzione del moto sismico atteso (vedi figura 10.6).

In ultimo, a supporto del giudizio complessivo e sui potenziali effetti sulla stabilità del terreno e delle strutture ivi insistenti, è opportuno valutare anche altri indicatori di pericolosità quale il parametro *LSN* (Van Ballegooy et al., 2013) (vedi allegato 6).

Il valore di *LSN* viene ricavato tramite l'integrazione, su tutta la colonna stratigrafica, del coefficiente di riconsolidazione verticale $\varepsilon_v$ calcolato con il metodo di Zhang et al. (2002). In tal modo vengono definiti i seguenti valori e scenari di riferimento:

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\varepsilon_v}{z} \cdot dz$$

| *LSN Range* | *Predominant performances* |
|---|---|
| *0 ÷ 10* | Little to no expression of liquefaction, minor effects |
| *10 ÷ 20* | *Minor expression of liquefaction some sand boil* |
| *20 ÷ 30* | *Moderate expression of liquefaction, with sand boil and structural damage* |
| *30 ÷ 40* | *Moderate to severe expression of liquefaction, settlement can cause structural damage* |
| *40 ÷ 50* | *Major expression of liquefaction, undulations and damage to ground surface, severe total and differential settlement of structure* |
| *>50* | *Severe damage, extensive evidence of liquefaction at surface, severe total and defferential settlement affetting structure, damage to services* |

Gli scenari di danno stimabili con il parametro *LSN* risultano significativamente condizionati dal rapporto tra strati liquefacibili/non liquefacibili, la loro posizione e la relativa deformabilità, cosa che il metodo, sulla scorta di prove ad alta risoluzione (quali CPTe/u), riesce a discriminare con buona affidabilità.

Tutti questi indicatori portano a stimare rispettivamente la probabilità di sviluppo del fenomeno, in relazione all'IPL e gli scenari di deformazione/danno attesi in superficie, sulla base dell'assetto stratigrafico rilevato e del rapporto fra orizzonti liquefacibili/non liquefacibili; ciò consente un giudizio più approfondito sul potenziale di danneggiamento e sulla severità delle manifestazioni superficiali attese.

In linea generale, osservando la carta di microzonazione e delle isopotenziali di liquefazione, è possibile apprezzare trend generali per cui i valori di IPL e cedimento e, quindi, di pericolosità per liquefazione, risultano condizionati da frequenza, spessore, omogeneità e profondità dei livelli sabbiosi, congiuntamente all'intensità delle azioni sismiche, variabili anche in relazione alla distanza dai nodi INGV per la stima delle azioni simiche di riferimento al suolo rigido.

Come osservabile dalla "Carta delle isopotenziali di liquefazione" (vedi figura 10.5) è possibile apprezzare trend generali per cui i valori di IPL e cedimento e, quindi, di pericolosità per liquefazione, tendano ad aumentare progressivamente procedendo da monte verso mare, commisuratamente all'aumento degli spessori del prisma sabbioso costiero; per buona parte del territorio urbanizzato, tali valori risultano essere caratteristici di un potenziale alto, a tratti molto alto. Coerentemente è possibile individuare una fascia a basso e medio potenziale, lungo la parte che si sviluppa al piede della paleo falesia, nella zona di assottigliamento del prisma sabbioso, ovvero secondo una profondità rispettivamente mediamente variabile fra 40-50 m e sino a 80-140 m, in virtù dell'assetto morfologico locale. Presenta un assetto più articolato l'intorno di interferenza con l'alveo del T. Uso, maggiormente influenzata dall'interazione con le dinamiche e depositi fluviali, interessando parzialmente la zona urbanizzata limitrofa. Anche le zone limitrofe alle foci dei corsi d'acqua minori risultano localmente interessate da processi di parziale alterazione/rimaneggiamento dei depositi costieri.

Un altro trend di rilievo, a scala territoriale comunale, è determinato dal progressivo incremento del potenziale di liquefazione generale spostandosi dal settore meridionale verso nord; inoltre, a partire circa all'altezza del Lago del Gelso, longitudinalmente allo sviluppo della fascia costiera verso nord, si individua una circoscritta fascia a potenziale tendenzialmente "molto alto", circa nelle zone corrispondenti al minimo morfologico dei contesti di retrospiaggia, caratterizzati generalmente anche da maggiori ristagni ed elevati livelli freatici (contesti in cui si manifesta la difficoltà di drenaggio con deviazione verso N – lungo costa - di tratti della rete scolante minore).

Quindi, per un giudizio complessivo circa i parametri di pericolosità stimati, si rileva quanto segue:

- In corrispondenza di zone o prove a medesimo grado di pericolosità per IPL, i valori di cedimento post-sismico atteso risultano sostanzialmente correlabili allo spessore dei materiali potenzialmente liquefacibili, fornendo un valore conservativo senza contemplare il rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili e la relativa profondità; tale aspetto talora può comportare valori di cedimento non sempre direttamente proporzionali agli andamenti di IPL.
- IPL offre una stima pesata con la profondità del grado di pericolosità in funzione della presenza e spessore lungo la verticale dei vari orizzonti liquefacibili/non liquefacibili (discretizzati secondo le situazioni FS<1 o FS>1), consentendo di discriminare specifiche soglie di rischio secondo valori di riferimento riconosciuti nella comunità scientifica e professionale, a livello nazionale ed internazionale (IPL=0, 2, 5, 15, >15).
- I cedimenti post-sismici attesi nelle zone caratterizzate da IPL<5 e, tanto più, da IPL<2 risultano generalmente contenuti e, talora, significativamente inferiori a 10 cm (soglia definibile per un grado di danneggiamento basso); solamente presso gli areali con valori di 5<IPL≤15 i cedimenti attesi risultano ricadere a cavallo della soglia dei 10 cm (7<ΔS< 13 cm), in relazione allo spessore e frequenza dei livelli sabbiosi presenti nel primo sottosuolo. Nelle zone con IPL>15 i cedimenti stimati risultano sempre maggiori di 10 cm (13<ΔS<18 cm), identificando un grado di danneggiamento/severità attesi "medio"( Ishihara e Yoshimine, 1992).
- LSN è un estimatore della severità di danno atteso in superficie; esso risulta maggiormente sensibile allo spessore della crosta superficiale, al rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili ed alla relativa profondità. LSN segue generalmente i trend di pericolosità evidenziati da IPL ma rispetto a quest'ultimo, poiché $\varepsilon_v$ varia in modo maggiormente progressivo in funzione dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione, talora risulta esaltare maggiormente (in eccesso o in difetto di pericolosità) situazioni stratigrafiche specifiche.
- A fronte di valori di IPL generalmente caratterizzanti un rischio Alto (5<IPL≤15), le caratteristiche geomeccaniche e stratigrafiche dei depositi presso tali zone, determinano valori di LSN e di cedimento massimo generalmente riconducibili a manifestazioni con grado/severità di danneggiamento atteso generalmente moderato o da moderato a localmente severo (20<LSN<40). In tutte le zone con IPL<5 i valori di LSN (4<LSN<10) indicano una bassa o limitata possibilità che si verifichino manifestazioni superficiali significative e con eventuali modesti effetti. Diversamente nelle zone identificate con rischio molto alto (IPL>15) i valori di severità risultano compresi nell'ambito 35<LSN<69, identificando talora zone caratterizzate da un severo grado di danneggiamento atteso o, comunque, da manifestazioni attese significative.

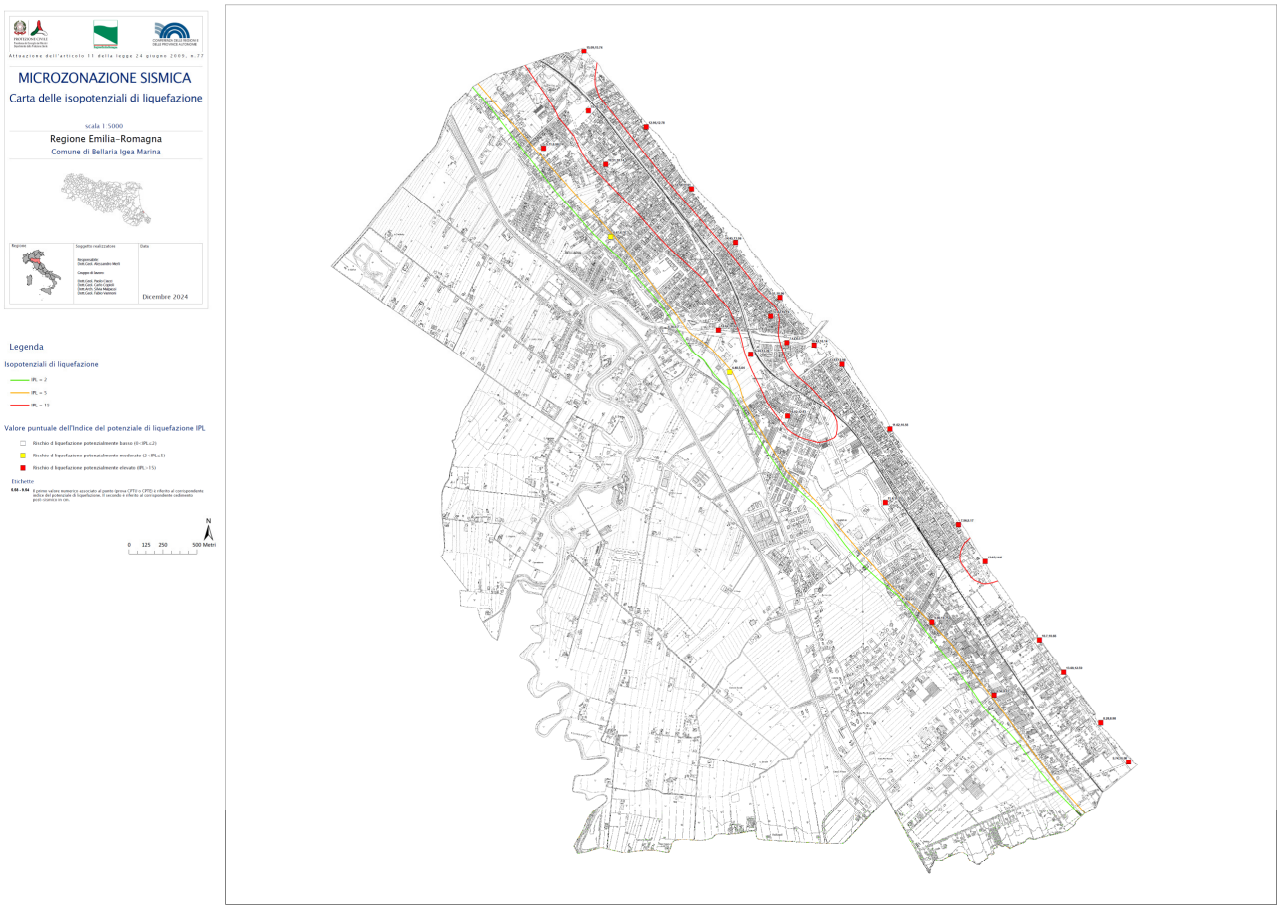



*Figura 10.5 – Miniatura esemplificativa della carta delle isopotenziali di liquefazione.*

Chiaramente gli scenari attesi e derivabili dai metodi semplificati possono essere significativamente influenzati da ulteriori variabili sito specifiche e sismogenetiche quali:

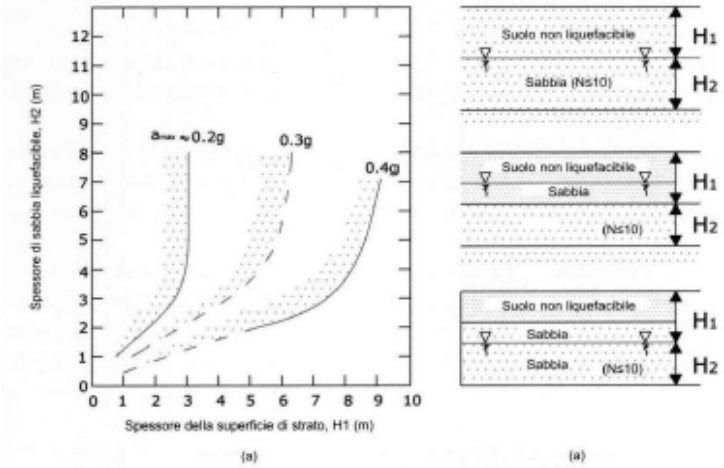
- fenomeni di direzionalità dell'azione sismica e tipologia di faglia
- distanza epi/ipocentrale, contenuto in frequenza, durata della fase forte, ecc.
- condizioni idrogeologiche e/o di drenaggio locale
- configurazioni geomorfologiche particolari e/o mancanza di contenimento laterale dei terreni (es. presenza di declivio, corsi d'acqua di significative dimensioni e profondità, fronti non sostenuti, strutture arginali, banchine portuali, ecc.)
- presenza di carichi piezometrici e/o falde in pressione
- presenza di gas nel sottosuolo
- fenomeni di interazione terreno struttura e/o presenza di sovraccarichi o carichi concentrati
- preesistenza di sforzi di taglio in condizioni statiche

In allegato n. 5 si riportano i report sintetici delle verifiche a liquefazione effettuate su ciascuna area, mentre in allegato n. 6 vengono illustrate le tabelle parametriche riepilogative di tutti i corrispondenti valori di IPL, LSN e cedimento calcolati per ciascuna zona di RSL ed in condizioni di campo libero (free-field).

*Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es. IPL=2 o IPL=5 ) e/o di zone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell'ambito di variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l'infrastruttura e/o area interessata.*

**Valutazione delle manifestazioni superficiali in funzione del rapporto fra lo spessore dello strato superficiale non liquefacibile e quello sottostante liquefacibile**

| Accelerazione [gal] 1 gal = 1 cm/s² | Condizione | Propagazione della liquefazione verso l'alto | Manifestazioni superficiali |
|---|---|---|---|
| 200 | $h_1 \geq 3$ m e $h_2 < 3$ m | IMPEDITA | NO |
| | $h_1 \leq 3$ m e $h_2 > 3$ m | NON IMPEDITA | SI |
| 300 | $h_1 < 5$ m e $h_2 > 4$ m | NON IMPEDITA | SI |
| | $h_1 > 5$ m e $h_2 < 4$ m | IMPEDITA | NO |
| 400 - 500 | $h_1 < 7$ m e $h_2 > 3$ m | NON IMPEDITA | SI |
| | $h_1 > 7$ m e $H_2 < 3$ m | IMPEDITA | NO |




Relazione fra lo spessore dello strato liquefacibile e lo spessore dello strato sovrapposto (Ishihara, 1985)

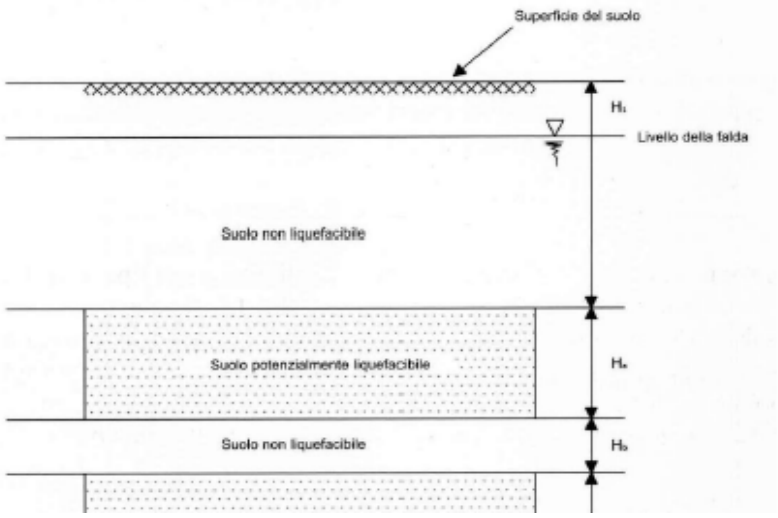


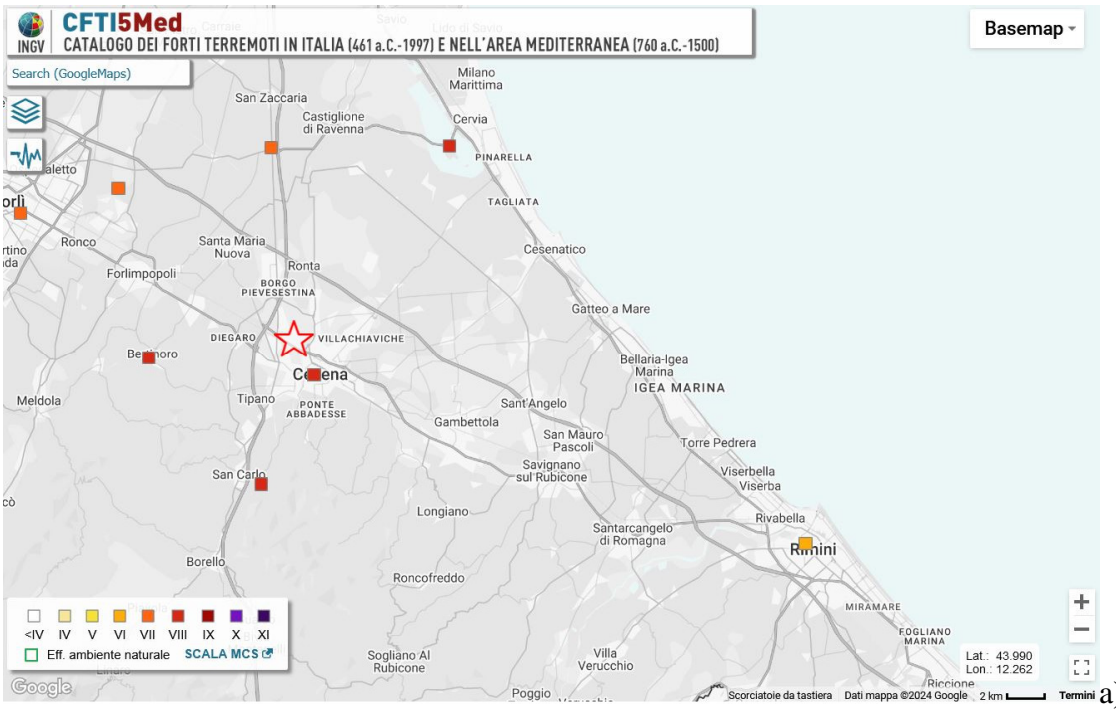

*Figura 10.6 – Schema per la valutazione delle manifestazioni superficiali per liquefazione (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995)*

## 11. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI

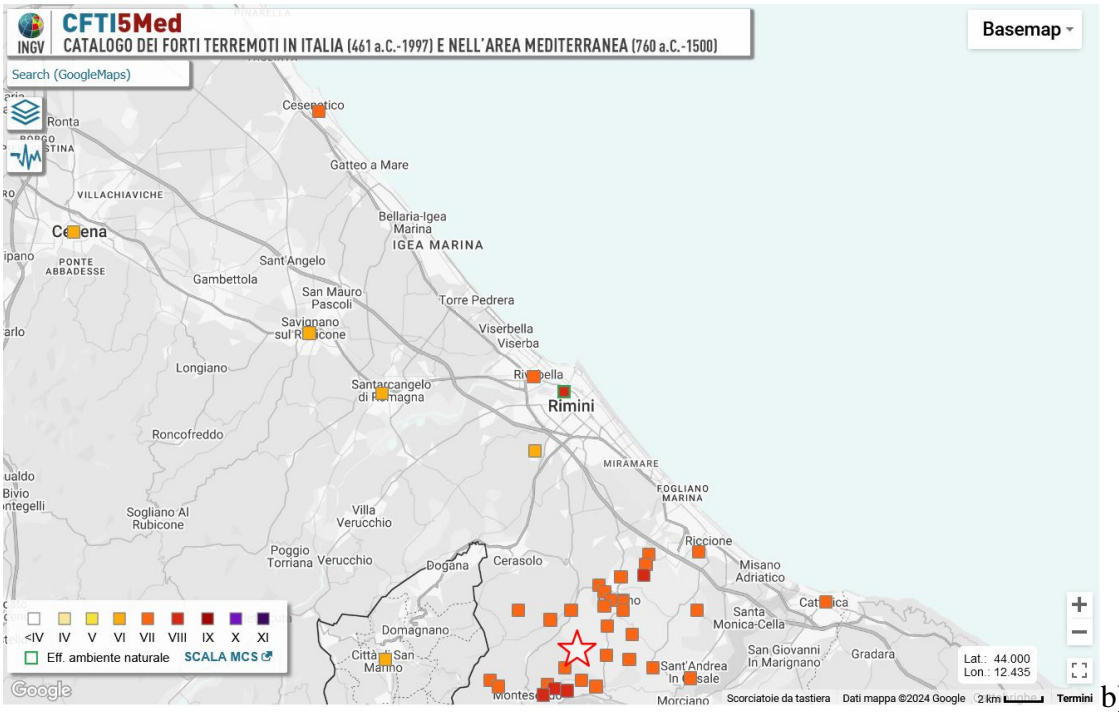
Come già ampiamente trattato nel precedente capitolo 3, le informazioni relative agli eventi sismici storici di riferimento specificamente per il territorio comunale di Bellaria-Igea Marina, sono desumibili prioritariamente dall'analisi del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), il quale fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima > 5 o magnitudo > 4.0 di interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2019 e che si riferisce al DB Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) vers. 4.0. La consultazione per località di tale catalogo, disponibile liberamente all'indirizzo http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15, fornendo i risultati mostrati al Cap. 3.

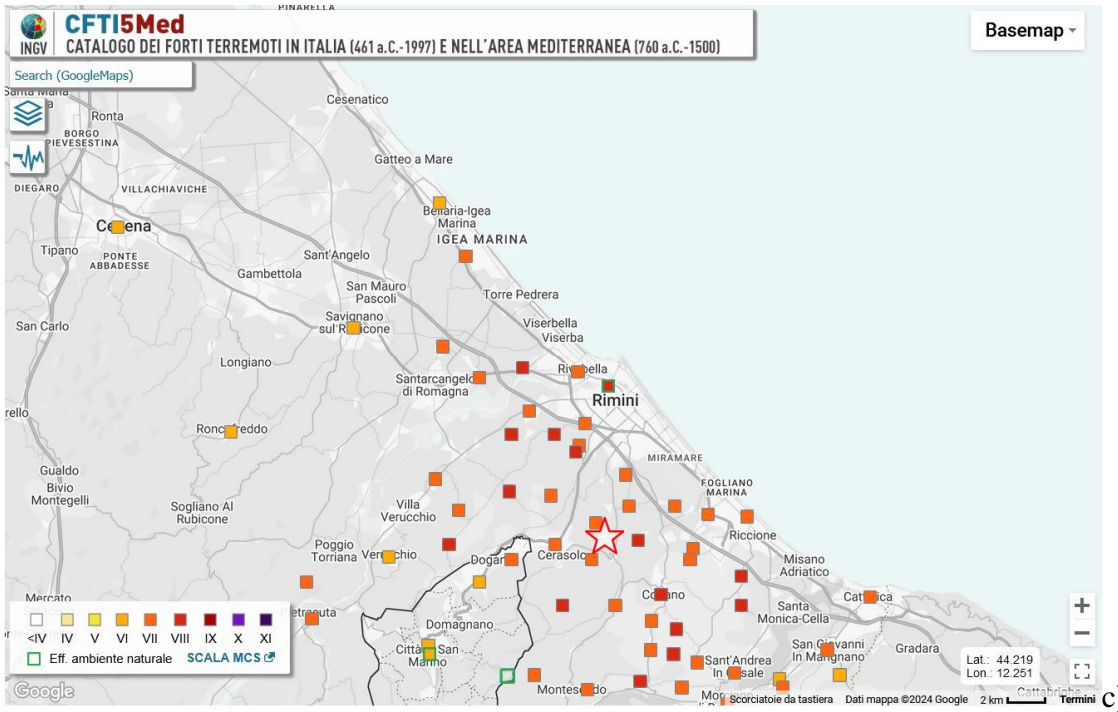
Il comune fu istituito nel 1956 per scorporo di tre frazioni del comune di Rimini: Bellaria, Igea Marina e Bordonchio; pertanto, per quanto attiene agli eventi precedenti a tale data, le eventuali informazioni storiche devono essere riferite al contesto ed agli archivi del Riminese.

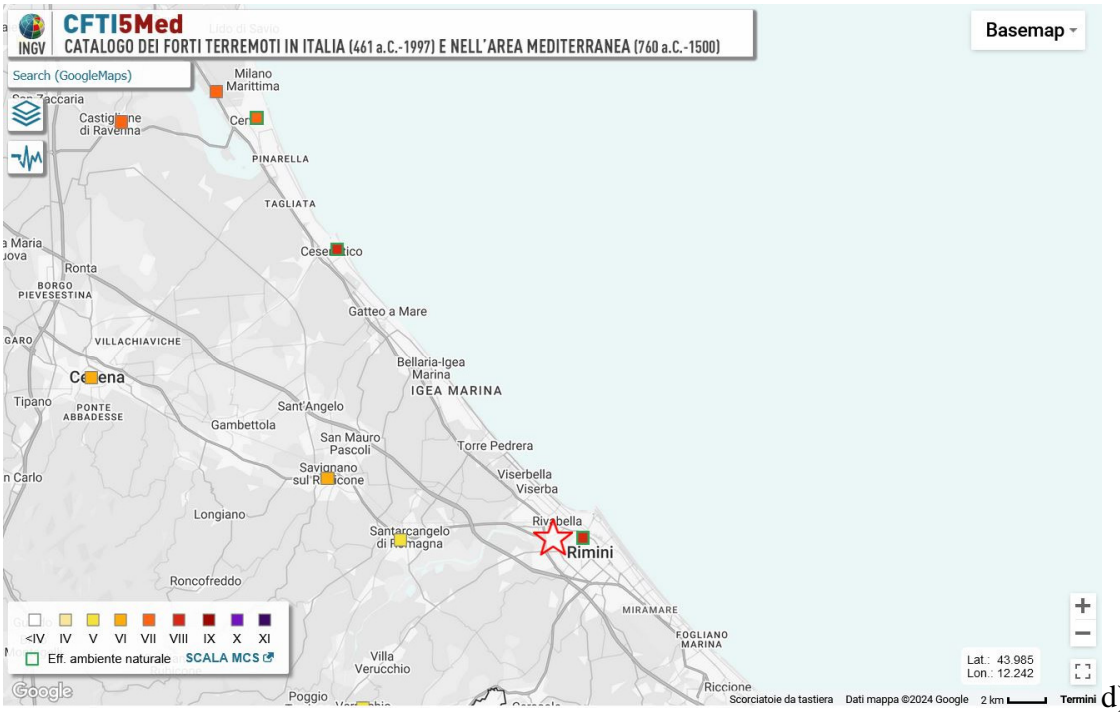
Purtroppo, tale catalogo contempla solo rari risentimenti di eventi sismici storicamente occorsi in comuni vicini spesso con magnitudo M>5 (es. Riminese, Romagna Meridionale, Costa Romagnola). Non se ne conosce il motivo ma verosimilmente solo recentemente, e in particolare dal primo '900, l'abitato di Bellaria-Igea Marina ha conosciuto un significativo sviluppo urbanistico, legato perlopiù all'espansione del comparto turistico/balneare. Ad es. nel catalogo di cui sopra, fra i terremoti che hanno interessato storicamente la Romagna, viene citato solo quello del 1786, trascurando gran parte dei terremoti dell'adiacente Riminese (1308, 1672, 1875, 1916) e quello del 1483 con epicentro stimato presso Cesena (Meq=5.7 e $I_{MCS}$=8-8.5) o, verosimilmente, anche quelli con epicentro presso la vicina Meldola occorsi nel 1870 (Meq=5.6 e $I_{MCS}$=8) e 1911 (Meq=5.3 e $I_{MCS}$=7). A completezza dell'argomentazione in figura (11.1 a-b-c) si riportano stralci del Catalogo $CFTI5_{MED}$ con le informazioni circa i maggiori terremoti limitrofi.

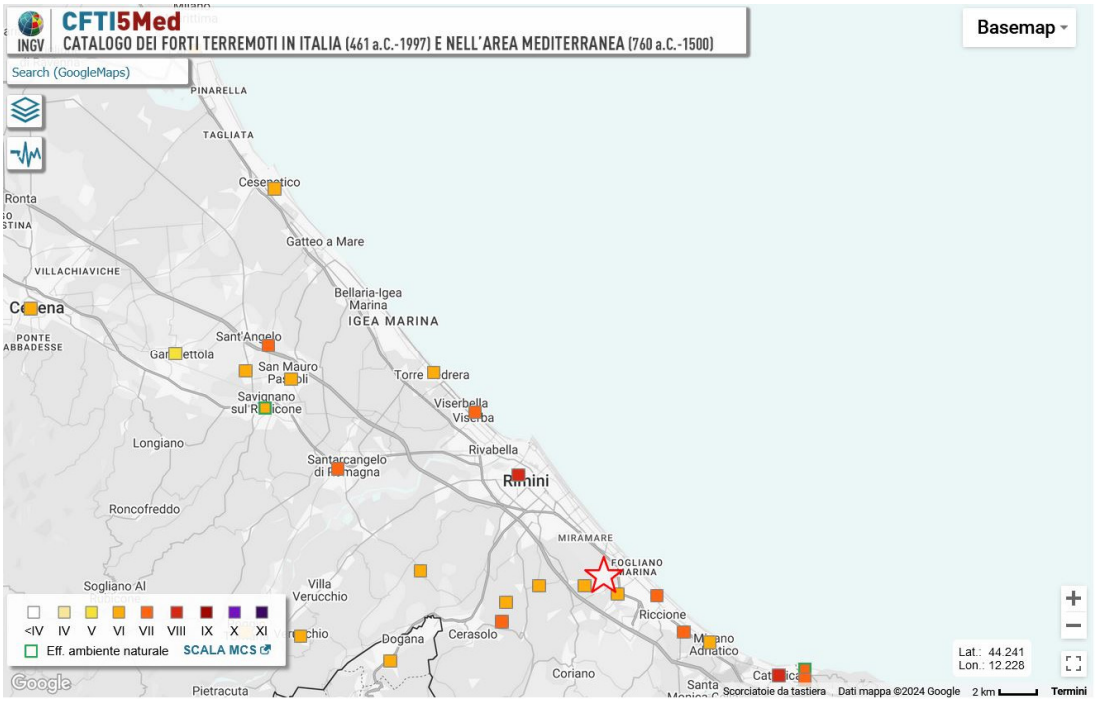


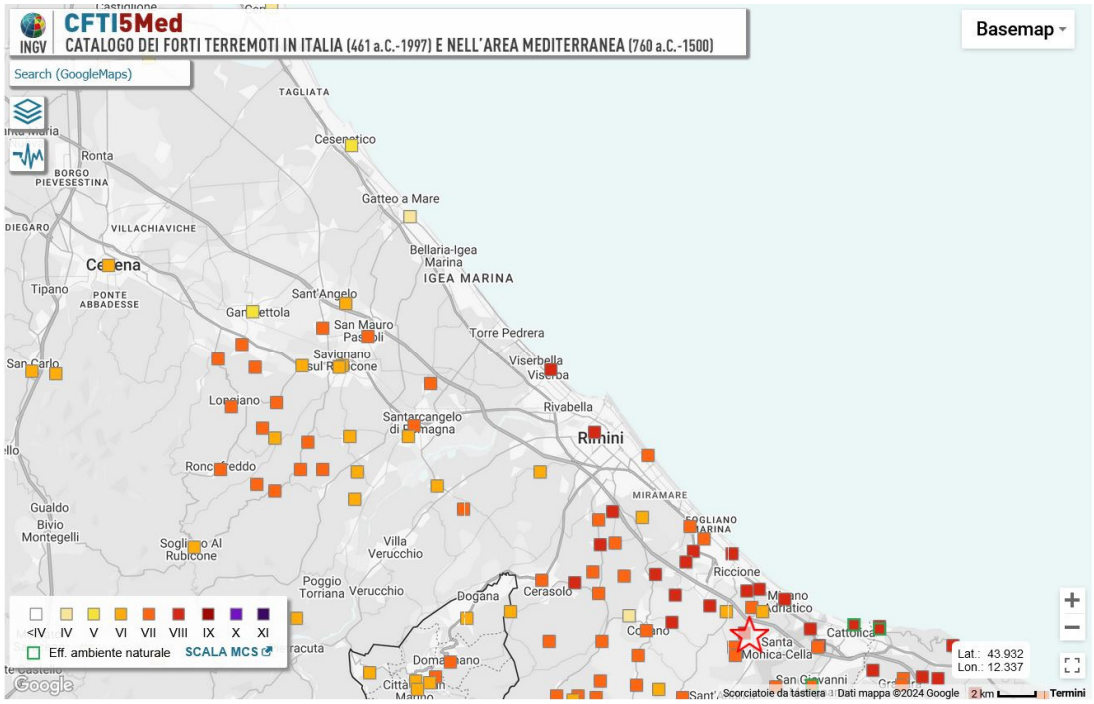
a)


CFTI5Med
CATALOGO DEI FORTI TERREMOTI IN ITALIA (461 a.C.-1997) E NELL'AREA MEDITERRANEA (760 a.C.-1500)
Basemap
Search (GoogleMaps)
Cesenatico
Gatteo a Mare
Bellaria-Igea Marina
IGEA MARINA
Cesena
Sant'Angelo
Gambettola
San Mauro Pascoli
Torre Pedrera
Viserbella
Viserba
Longiano
Santarcangelo di Romagna
Rimini
Roncofreddo
MIRAMARE
FOGLIANO MARINA
Sogliano Al Rubicone
Villa Verucchio
Poggio Torriana
Dogana
Cerasolo
Riccione
Misano Adriatico
Domagnano
Città di San Marino
Santa Monica-Cella
San Giovanni In Marignano
Gradara
Sant'Andrea In Casale
Morciano
<IV IV V VI VII VIII IX X XI
Eff. ambiente naturale
SCALA MCS
Lat.: 44.000
Lon.: 12.435
Scorciatoie da tastiera
Dati mappa ©2024 Google
2 km
Termini
Google
b)


CFTI5Med
CATALOGO DEI FORTI TERREMOTI IN ITALIA (461 a.C.-1997) E NELL'AREA MEDITERRANEA (760 a.C.-1500)
Basemap
Search (GoogleMaps)
Cesenatico
Ronta
Gatteo a Mare
VILLACHIAVICHE
Bellaria-Igea Marina
IGEA MARINA
Cesena
Tipano
PONTE ABBADESSE
Sant'Angelo
Gambettola
San Mauro Pascoli
Torre Pedrera
San Carlo
Savignano sul Rubicone
Viserbella
Viserba
Longiano
Santarcangelo di Romagna
Rimini
Roncofreddo
MIRAMARE
FOGLIANO MARINA
Gualdo
Bivio Montegelli
Sogliano Al Rubicone
Villa Verucchio
Poggio Torriana
Dogana
Cerasolo
Riccione
Misano Adriatico
Domagnano
Città di San Marino
Santa Monica-Cella
San Giovanni In Marignano
Gradara
Sant'Andrea In Casale
Montescudo
<IV IV V VI VII VIII IX X XI
Eff. ambiente naturale
SCALA MCS
Lat.: 44.219
Lon.: 12.251
Scorciatoie da tastiera
Dati mappa ©2024 Google
2 km
Termini
Google
c)


CFTI5Med
CATALOGO DEI FORTI TERREMOTI IN ITALIA (461 a.C.-1997) E NELL'AREA MEDITERRANEA (760 a.C.-1500)
INGV
Basemap
Search (GoogleMaps)
Milano Marittima
PINARELLA
TAGLIATA
Cesenatico
Ronta
BORGO PIEVESESTINA
Gatteo a Mare
VILLACHIAVICHE
Bellaria-Igea Marina
IGEA MARINA
Tipano
PONTE ABBADESSE
Sant'Angelo
Gambettola
San Mauro Pascoli
Torre Pedrera
Viserbella
Viserba
Longiano
Rivabella
Rimini
Roncofreddo
MIRAMARE
FOGLIANO MARINA
Villa Verucchio
Riccione
Poggio
<IV IV V VI VII VIII IX X XI
Eff. ambiente naturale
SCALA MCS
Lat.: 43.985
Lon.: 12.242
Scorciatoie da tastiera
Dati mappa ©2024 Google
2 km
Termini
d)


CFTI5Med
CATALOGO DEI FORTI TERREMOTI IN ITALIA (461 a.C.-1997) E NELL'AREA MEDITERRANEA (760 a.C.-1500)
INGV
Basemap
Search (GoogleMaps)
PINARELLA
TAGLIATA
Cesenatico
Ronta
Gatteo a Mare
VILLACHIAVICHE
Bellaria-Igea Marina
IGEA MARINA
PONTE ABBADESSE
Sant'Angelo
San Mauro
Torre
Viserbella
Viserba
Longiano
Rivabella
Rimini
Roncofreddo
MIRAMARE
FOGLIANO MARINA
Sogliano Al
Villa Verucchio
Riccione
Cerasolo
Dogana
Coriano
Pietracuta
<IV IV V VI VII VIII IX X XI
Eff. ambiente naturale
SCALA MCS
Lat.: 44.241
Lon.: 12.228
Scorciatoie da tastiera
Dati mappa ©2024 Google
2 km
Termini
e)



f)

*Figura 11.1 – Stralci Catalogo CFTI5$_{MED}$ con rappresentazione dei terremoti storici con epicentro presso Cesena (1483) a), Rimini (1672) b), Costa Romagnola (1786) c), Rimini (1875) d), Rimini (1916 - Maggio) e), Rimini (1916 - Agosto) f)* ,

Pertanto come è rilevabile in occasione dell'evento sismico del 1786, nell'areale del comune si sono registrati risentimenti di grado VII°; diversamente, ad esempio per l'evento del 1875, si rilevano danni sino all'VIII° grado sia a Rimini che a Cesenatico e Cervia, anche con diffuse manifestazioni superficiali (fessure, fratture, spaccature, liquefazioni) e persino evidenze di maremoto (sebbene non distruttivo), mentre nel tratto costiero ricompreso fra le due località (tra cui Bellaria-Igea Marina) non si ha alcuna notizia.

In ogni caso tali epicentri, riferibili a sorgenti sismogenetiche vicine, risultano congruenti con i diagrammi di disaggregazione proposti da INGV – Progetto S1 (paragrafo 3 – figura 3.6) relativi ai nodi di riferimento per il comune in oggetto. Inoltre nelle valutazioni generali si deve tener conto del fatto che l'areale comunale ricade pienamente nell'ambito della struttura sismogenetica ITCS039 e parzialmente nella ITIS036, così come individuatr nel Catalogo DISS 3.3.0 (INGV).

Pertanto ai fini della pericolosità sismica le valutazioni espresse al Capitolo 3 si ritengono coerenti con i dati di sismicità storica generale del riminese e del contesto territoriale costiero romagnolo

## 12. CONCLUSIONI

Lo studio di microzonazione sismica effettuato sul territorio del Comune di Bellaria-Igea Marina, integrando le analisi di III Livello di Approfondimento con lo studio di I-II Livello, conformemente ai contenuti della DGR 630/2019 e successiva DGR 476/2021 come integrata dalla DGR 564/2021, ha permesso di valutare la pericolosità sismica sia nelle aree urbane che in quelle di prevista urbanizzazione. I dati sono stati elaborati e restituiti secondo i più recenti standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.2. Data anche l'abbondanza delle conoscenze litostratigrafiche e vista la estesa campagna geognostica/geofisica di riferimento, la microzonazione sismica è stata estesa anche al territorio rurale limitrofo.
Le carte di microzonazione sismica riportano i valori dei Fattori di Amplificazione (FA) individuati per tutto il territorio comunale, di riferimento generale per tutte le valutazioni di carattere urbanistico.

In base alle condizioni stratigrafiche e topografiche locali ed ai relativi profili di Vs il moto sismico atteso è stato definito secondo specifici fattori di amplificazione della PGA (FA_PGA), dello spettro elastico in accelerazione, denominati Fa_SA1 - Fa_SA2 - Fa_SA3 e localmente anche Fa_SA4 (rispettivamente per intervalli compresi tra 0,1s≤T≤0,5s, 0,4s≤T≤0,8s, 0,7s≤T≤1,1s e 0,5s≤T≤1,5s) nonché dell'intensità di Housner denominati Fa_SI1 - Fa_SI2 e localmente Fa_SI3 (riferiti ad intervalli spettrali compresi tra 0,1-0,5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s).

Per una rappresentazione assoluta della pericolosità sismica del territorio si è definita anche una zonazione del territorio in termini di intensità sismica assoluta $H_{SM}$ (definita in "g" e valida per l'intervallo spettrale di periodo 0,1s≤T≤0,5s), al fine di consentire una reale graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee ed una più diretta valutazione semi-quantitativa del rischio sismico.
In corrispondenza delle aree oggetto di III Livello di Approfondimento il parametro di intensità sismica assoluta è stato definito anche per gli intervalli di periodo 0,4s≤T≤0,8s ($H_{0408}$), 0,7s≤T≤1,1s ($H_{0711}$) e 0,5s≤T≤1,5s ($H_{0515}$).
Non sono state individuate zone stabili con assenza di effetti amplificativi. Pertanto sono presenti zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, con effetto dell'assetto litostratigrafico e zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a possibili deformazioni permanenti nel territorio e nel primo sottosuolo. In tal caso si tratta di zone soggette ad instabilità per potenziale rischio per liquefazione, a cui risultano soggette soprattutto le aree costiere a valle della paleofalesia, che la carta delle MOPS individua con il codice 30502007 e 30502008; le zone $ZS_{LQ}$ interessano una significativa parte dell'urbanizzato, degli arenili, lungomari e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, scuole, ecc.). In corrispondenza di alcuni settori centrali e settentrionali dell'ambito costiero si sono individuate anche zone $ZR_{LQ}$ (IL>15).

A seguito degli approfondimenti di Livello III, svolti secondo scenari di pericolosità sismica definiti per un tempo di ritorno di Tr=475 anni, una parte delle zone costiere individuate come "Zone di attenzione per instabilità" (Zone 30502005 e 30502006), in virtù di particolari aspetti deposizionali (litologia e interferenza con i depositi del T. Uso) e/o di assetto stratigrafico (tratto di assottigliamento/chiusura dei depositi costieri al piede della paleofalesia), sono risultate contraddistinte da valori di potenziale di liquefazione $0 \leq IL \leq 2$, generalmente indice di una bassa probabilità di occorrenza oltreché di modeste manifestazioni superficiali e ridotti cedimenti post-sismici attesi. Pertanto nelle carte di approfondimento superiore (Livello III) tali aree sono state stralciate dalle Zone suscettibili per liquefazione $ZS_{LQ}$.

Tuttavia si ribadisce come tali valutazioni siano afferibili solo a scenari con $Tr \leq 475$ anni, mentre per tempi di ritorno superiori, in virtù degli assetti stratigrafici ed idrogeologici ivi rilevati, possa talora sussistere il rischio per liquefazione e, quindi, all'occorrenza debba essere attentamente valutato.

In tal senso le numerose verifiche di *RSL* e del *Potenziale di Liquefazione* hanno permesso di quantificare i possibili effetti conseguenti ad un ipotetico sisma sul territorio oggetto di studio. Nella carta di Microzonazione con approfondimenti (III livello), che rappresenta l'elaborato finale degli studi, ogni microzona è stata caratterizzata mediante 3 importanti fattori: il primo quantifica l'entità e le amplificazioni attese del moto sismico (in termini di accelerazione massima al suolo *PGA* nonché dei vari Fattori di Amplificazione spettrale secondo vari intervalli temporali di interesse), il secondo (potenziale di liquefazione *IPL*) è un indicatore della pericolosità dei terreni nei confronti di potenziali fenomeni di liquefazione nonché della severità delle potenziali manifestazioni superficiali attese, il terzo (espresso numericamente al fianco di ciascun punto di indagine) contempla i cedimenti post-simici attesi a seguito di un eventuale innesco della liquefazione in condizioni di free-field.
Ulteriori considerazioni, per un giudizio complessivo in merito a ciascuna zona di indagine, potranno essere condotte valutando anche i corrispondenti valori di LSN, utili a stimare la severità delle manifestazioni e gli scenari di danneggiamento atteso in superficie (vedi allegato n. 6).
L'innesco e sviluppo della liquefazione, quale fenomeno complesso dal punto di vista dei fattori predisponenti e scatenanti, risulterà comunque fortemente condizionato da specifiche condizioni sismogenetiche (distanza epi/ipocentrale, fenomeni di direttività, contenuto in frequenza del segnale, durata della fase forte, ecc.) e/o dalla presenza di stati tensionali preesistenti, imputabili alla presenza di opere/strutture o situazioni morfologiche ed idrogeologiche particolari.
Considerata la continuità dei depositi sabbiosi costieri, l'entità dei fenomeni e gli aspetti di non linearità ipotizzabili per il comportamento dinamico/ciclico dei terreni, all'occorrenza e/o in fase di progettazione esecutiva per opere strategiche (e/o di rilevanza) potrà essere opportuno condurre ulteriori approfondimenti di studio tramite analisi con prove di laboratorio ciclico/dinamico ed eventualmente di risposta sismica di sito con metodi di calcolo non lineari ed in tensioni efficaci opportunamente calibrati; tali approfondimenti, soprattutto nelle zone a rischio elevato-molto elevato, consentiranno di simulare con maggior precisione i

fenomeni di amplificazione sismica, gli aspetti deformativi e le sovrappressioni interstiziali attesi nelle condizioni sismiche di progetto.

*Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es. IPL=2 o IPL=5 ) e/o di zone/microzone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell'ambito di tale variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l'infrastruttura e/o area interessata.*

In particolare, conformemente a quanto indicato nelle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)" (D.P.C., versione 1.0, 2018), qualora risulti necessario valutare/verificare situazioni di maggior dettaglio a cavallo o nell'ambito delle zone $ZR_{LQ}$, o una revisione/riperimetrazione di maggior dettaglio di tali aree o delle $ZS_{LQ}$, si renderà necessario un adeguato approfondimento di indagine con applicazione di appropriate metodologie di analisi di suscettibilità alla liquefazione.

Dalla consultazione del database Ithaca, inoltre, non risultano presenti elementi tettonici attivi e capaci, certi e documentati, che possano determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in studio.

Qualora si voglia procedere ad approfondimenti di particolare dettaglio attraverso analisi di risposta sismica locale (RSL), eseguite con criteri di innegabile scientificità e supportate da adeguate indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio, le risultanze ottenute saranno di grande utilità nel confronto con i dati ottenuti nelle carte di microzonazione e potranno essere utilizzate in sostituzione dei valori di FA previsti sul territorio oggetto di RSL nonché a supporto di approfondite analisi circa le aree a potenziale instabilità.

Tali informazioni potranno essere pertanto di ausilio sia per la progettazione urbanistica che per la pianificazione territoriale ai fini della mitigazione del rischio sismico nelle aree di interesse e per la pubblica incolumità.
Tutte le analisi e verifiche sono state condotte in ottemperanza alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021 della Regione Emilia Romagna nonché alle indicazioni nazionali ICMS 2008, trattando i dati secondo gli standard di rappresentazione ed archiviazione 4.2.

## 13. BIBLIOGRAFIA

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 CPTI15 https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/

Dipartimento della Protezione Civile, "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", 2008

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 476/2021 "Aggiornamento dell' Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017) di cui alla deliberazione della giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 564/2021 del 26/04/2021, INTEGRAZIONE DELLA PROPRIA DELIBERAZIONE N. 476 DEL 12 APRILE 2021 MEDIANTE APPROVAZIONE DELL'ALLEGATO A, "ATTO DI COORDINAMENTO TECNICO SUGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)"

*Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3*

DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) - vers. 3.3.0 https://diss.ingv.it/mapper/

EMIDIUS http://emidius.mi.ingv.it/GNDT/ZONE/zone_sismo.html

INGV http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf

ISIDE http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp

ITHACA (ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAzard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx).

PROTEZIONE CIVILE http://www.protezionecivile.gov.it

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

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

Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 256-Rimini (2005) - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna . . S .EL .CA ., Firenze

Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 255-Cesena (2008) - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna . . S .EL .CA ., Firenze.

Chen, C. J., & Juang, C. H., (2000). ''Calibration of SPT- and CPT based liquefaction evaluation methods.'' Innovations applications in geotechnical site characterization, P. Mayne and R. Hryciw, eds., Geotechnical Special Publication No. 97, ASCE, New York, pp: 49–64.

Facciorusso, J., 2008. Calcolo del potenziale di liquefazione su vasta scala: approccio deterministico e approccio probabilistico. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Catania.

Galli, P. (2000). New Empirical Relationships between Magnitude and Distance for Liquefaction. Tectonophysics, 324, 169 - 187.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.

Ishihara, K., (1996) "*Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*". Clarendon, Oxford.

Ishihara, K. & Yoshimine, M. (1992). *Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes*, Soils and Foundations, 32 (1), 173–188.

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978). "Apractical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan." Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, 885-896.

Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. (1982). "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes." Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton UK, 925-939.

Juang, C. H., et Al. (2001). Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering "*Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation ".*

Linee Guida AGI – Aspetti geotecnici della progettazione in zona simica – 2005

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni – versione 2.0, anno 2022

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni – versione 1.0, anno 2018

Merli A. (2019). "Indagini sperimentali e analisi numeriche finalizzate alla progettazione di interventi di permeazione con nanosilice colloidale per la stabilizzazione delle sabbie costiere sotto edifici esistenti nella fascia costiera nord-adriatica". UNIVPM - PhD Thesis.

Merli A., Capatti M.C. & Dezi F. (2016). "Different measuring methods for estimating the hydraulic conductivity on the shallow aquifer along a stretch of the Rimini Coast". VI Italian Conference of Reserchers in Geotechnical Engineering, Bologna 2016.

Merli A., Saccenti A. & Dezi F. (2017). "Indagini preliminari per tecniche di stabilizzazione passive delle sabbie costiere riminesi suscettibili a liquefazione". Proc. of the XXVI National Conference in Geotechnics, CNG 2017, Rome 2017.

Merli A., Dezi F., Tropeano G., Chiaradonna A. & d'Onofrio A. (2019). "Site response analysis in effective stress of a coastal area the North-Western Adriatic seaside (Italy)". Proc. of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 7ICEGE, Roma, 2019.

Merli A., Dezi F. (2021). "Assessing the effectiveness of a liquefaction mitigation intervention in some urbanized coastal areas in Italy". Proc. of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan, 2021.

Merli A. Capogruppo RTI (2021-2022). *Studio di Microzonazione Sismica di III Livello con adeguamento del I e II Livello del Comune di Rimini ai sensi della DGR N. 573/2016 e dell'Ordinanza CDPC n. 293/2015* – Comune di Rimini.

NASEM Report (2016). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake - Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). ISBN: 978 - 0 - 309 - 44027 - 1. DOI: https://doi.org/10.17226/23474.

Papathanassiou, G. (2008). "LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence." Engineering Geology, 96(1/2), 94-104.

Report ASCE, (2011), Ku, C.S., et Al., *"Liquefaction Probability by Probabilistic Version of Robertson and Wride Model*". ASCE.

Robertson P.K., "Performance based earthquake design using the CPT". In proceedings of IS-Tokyo 2009: International conference on performance-based design inearthquake geotechnical engineering- From case history to practice, Tokyo, Japan, 15-18 June(2009).

Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Rep. No. EERC 72 - 12, EERI, Berkeley, Calif.

Seed, H.B., and Idriss, I.M., (1971). "Simplified Procedure for evaluating soil liquefaction potential". Journal Soil Mechanics and Foundations, ASCE .

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

S. Toprak, T.L. Holzer, M.J. Bannett, J.C. Tinslay, *"CPT and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential."* Proceedings of 7th U.S.–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Technical Report MCEER-99-0019(1999).

S. van Ballegooy, P.J. Malan, M.E. Jacka, V.I.M.F. Lacrosse, J.R. Leeves & J.E. Lyth / Tonkin & Taylor Limited - H. Cowan / New Zealand Earthquake Commission, "Methods for characterising effects of liquefaction in terms of damage severity", 15WCEE Lisboa, 2012.

Tonkin and Taylor Ltd (2013) Liquefaction vulnerability study, Tonkin and Taylor Report for The Earthquake Commission 52020.0200/v1.0. February 2013.

Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003). "Liquefaction potential index: field assessment." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(4), 315–322.

Zhang, G., Robertson, P. K., Brachman, R. W. I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, Canadian Geotechnical Journal, 39, 1168–80.

Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I., (2004). Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 861.