

Piano Territoriale di Area Vasta
Allegato al Quadro Conoscitivo Diagnostico
Parte II – I Sistemi Funzionali (SF)

**SF 4. LA SICUREZZA TERRITORIALE – Approfondimento sulla
pericolosità sismica**



Provincia di Ferrara

A cura del Servizio Pianificazione Territoriale e Urbanistica:

Resp. Arch. Manuela Coppari

Arch. Chiara Cavicchi

Arch. Ambra Stivaletta

Arch. Sara Ardizzoni

Geol. Giacomo Carloni

Ha curato la stesura del testo: Geol. Giacomo Carloni

Hanno curato la redazione della cartografia: Geol. Giacomo Carloni; Arch. Sara Ardizzoni

Con la collaborazione della Regione Emilia-Romagna – Area Geologia, Suoli e sismica: Geol. Luca Martelli

Aggiornamento novembre 2024

Indice

1. PREMESSA	3
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	4
3. SISMOTETTONICA	18
4. SISMICITA'	23
5. LA PERICOLOSITÀ SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E LA PROGETTAZIONE	30
5.1. Pericolosità sismica di base.....	30
5.2. Effetti locali e microzonazione sismica	31
5.3. L'analisi della condizione limite di emergenza	33
6. RAPPRESENTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA A SCALA DI AREA VASTA	34
6.1. Criteri cartografici adottati.....	34
6.2. Carta geologico-tecnica nei primi 20 m di sottosuolo	34
6.3. Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali	37
7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	42
8. BILANCIO ALL'INTERNO DEL SISTEMA DELLA SICUREZZA TERRITORIALE.....	43
9. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	44

1. PREMESSA

Nel territorio ferrarese, dall'osservazione degli effetti dei terremoti passati, è noto che alcune condizioni geologo-tecniche e stratigrafiche possono modificare il moto sismico in superficie e potenzialmente comportare un rischio rilevante per infrastrutture, edifici e per la salute umana.

Per una più efficace strategia di riduzione del rischio sismico è quindi di particolare interesse conoscere dove sono presenti terreni che possono aumentare lo scuotimento atteso e determinare fenomeni di instabilità sismoindotta. Questi sono per esempio fenomeni di liquefazione, *Lateral Spreading* degli argini dei corsi d'acqua/canali e cedimenti per riconsolidazione di terreni soffici che possono provocare spostamenti/rotture del terreno. L'amplificazione del moto sismico e i fenomeni di instabilità sismoindotta sono noti come "effetti locali" o "effetti di sito".

Per questi motivi, la normativa in materia di pianificazione territoriale ed urbanistica richiede la preventiva analisi della pericolosità sismica del territorio per l'approvazione dei piani e che le scelte urbanistiche siano compatibili con gli effetti locali attesi.

Già con la LR 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio" era richiesta l'analisi della pericolosità sismica a scala di area vasta con finalità di indirizzo per la pianificazione a scala comunale (v. DAL 112/2007 «Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"). Tale aspetto è stato ribadito dalla LR 19/2008 "Norme per la riduzione del rischio sismico" (artt. 6 e 7) e quindi confermato dalla LR 24/2017 "Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio" (art. 22) e dall'atto di indirizzo tecnico approvato con DGR 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)", e successivi aggiornamenti (DGR n. 476/2021 e DGR n. 564/2021).

La Provincia di Ferrara ha effettuato una prima analisi della pericolosità sismica del proprio territorio negli anni 2013-2014, a seguito del Sisma 2012, come documento tecnico a supporto del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) vigente adottato con Delibera n. 32/2014 ed approvato con Delibera n. 34/2018, realizzando i seguenti prodotti cartografici:

- "Carta della litologia di superficie";
- "Carta della geologia di superficie";
- "Carta delle aree suscettibili di effetti locali";
- "Carta dei fattori di amplificazione";

- “Carta delle indagini e del potenziale di liquefazione”;
- “Carta del rischio di cedimenti”

In questi ultimi anni è stata completata la microzonazione sismica dei Comuni ferraresi e sono stati pubblicati numerosi nuovi dati sulla neotettonica e sismicità dell’area, quali gli aggiornamenti dei cataloghi della sismicità (Locati et al., 2022; Rovida et al., 2022), di quelli nazionali delle faglie attive “ITHACA (ITaly HAZards from CApable faults) - Catalogo delle faglie capaci in Italia” (ITHACA Working Group, 2019) e delle sorgenti sismogenetiche DISS 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) nonché la carta sismotettonica regionale (Martelli et al., 2017a). Pertanto, per il nuovo Piano Territoriale di Area Vasta si è ritenuto utile aggiornare la cartografia di pericolosità sismica, al fine di fornire ai Comuni e alle Unioni di Comuni una documentazione tecnico-scientifica di base e una linea d’indirizzo per gli approfondimenti a scala urbana richiesti dalla LR 24/2017, come indicato anche dagli indirizzi regionali per la microzonazione sismica (DGR 630/2019, cap. 2 “Disposizioni generali”). L’aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2018) e degli indirizzi regionali per la microzonazione sismica (DGR n. 476/2021, integrata con DGR n. 564/2021) hanno fornito riferimenti e indicazioni per la stima e la rappresentazione della pericolosità sismica locale.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La Provincia di Ferrara ([Fig. 2.1](#)) confina a nord con il Veneto e la Lombardia, a ovest con la provincia di Modena, a sud-ovest con la provincia di Bologna, a sud con la provincia di Ravenna e a est con il mare Adriatico. Il territorio ricade nel settore di pianura alluvionale compreso tra il fiume Po, a nord, e il fiume Reno, a sud. Ferrara, il capoluogo, è situata nella parte occidentale della provincia e dista circa 50 km da Bologna.

La provincia è nota per il Parco del Delta del Po, una vasta area naturale protetta, per le numerose e varie attività produttive, turistiche e sociali e per i beni artistici, storici e culturali. Tutto ciò costituisce senz’altro una grande ricchezza per il territorio ma allo stesso tempo aumenta l’esposizione ai rischi naturali quali, ad esempio, quello sismico.

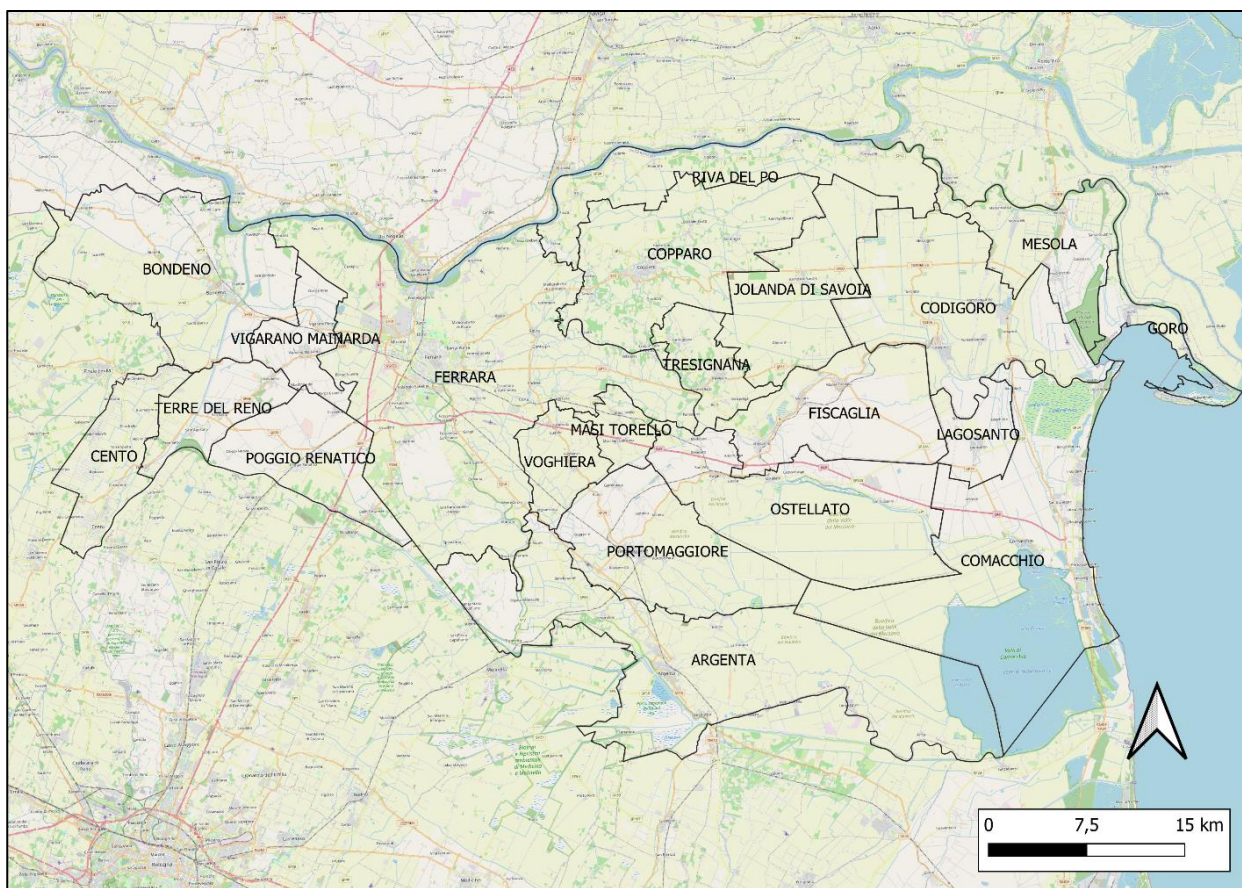


Figura 2.1: inquadramento geografico e territoriale della Provincia di Ferrara

Il territorio provinciale è caratterizzato da un'altimetria prevalentemente pianeggiante ([Fig. 2.2](#)), con altitudini che variano tra pochi metri sopra il livello del mare nel settore occidentale e, nel settore orientale, estese aree addirittura sotto il livello del mare (zona del delta del Po e Valli di Comacchio). Questa conformazione rende il territorio ferrarese particolarmente vulnerabile a rischi idrogeologici come le inondazioni e gli allagamenti, specialmente in occasione di piene del fiume Po e dei suoi affluenti e del fiume Reno. Il territorio è anche soggetto a fenomeni di abbassamento del suolo (subsidenza), accentuato dall'estrazione di acqua e gas dal sottosuolo. Per mitigare questi rischi, sono stati costruiti numerosi argini, canali di bonifica e sistemi di drenaggio, che, tuttavia, richiedono una costante manutenzione e monitoraggio per garantire la sicurezza del territorio e delle sue popolazioni.

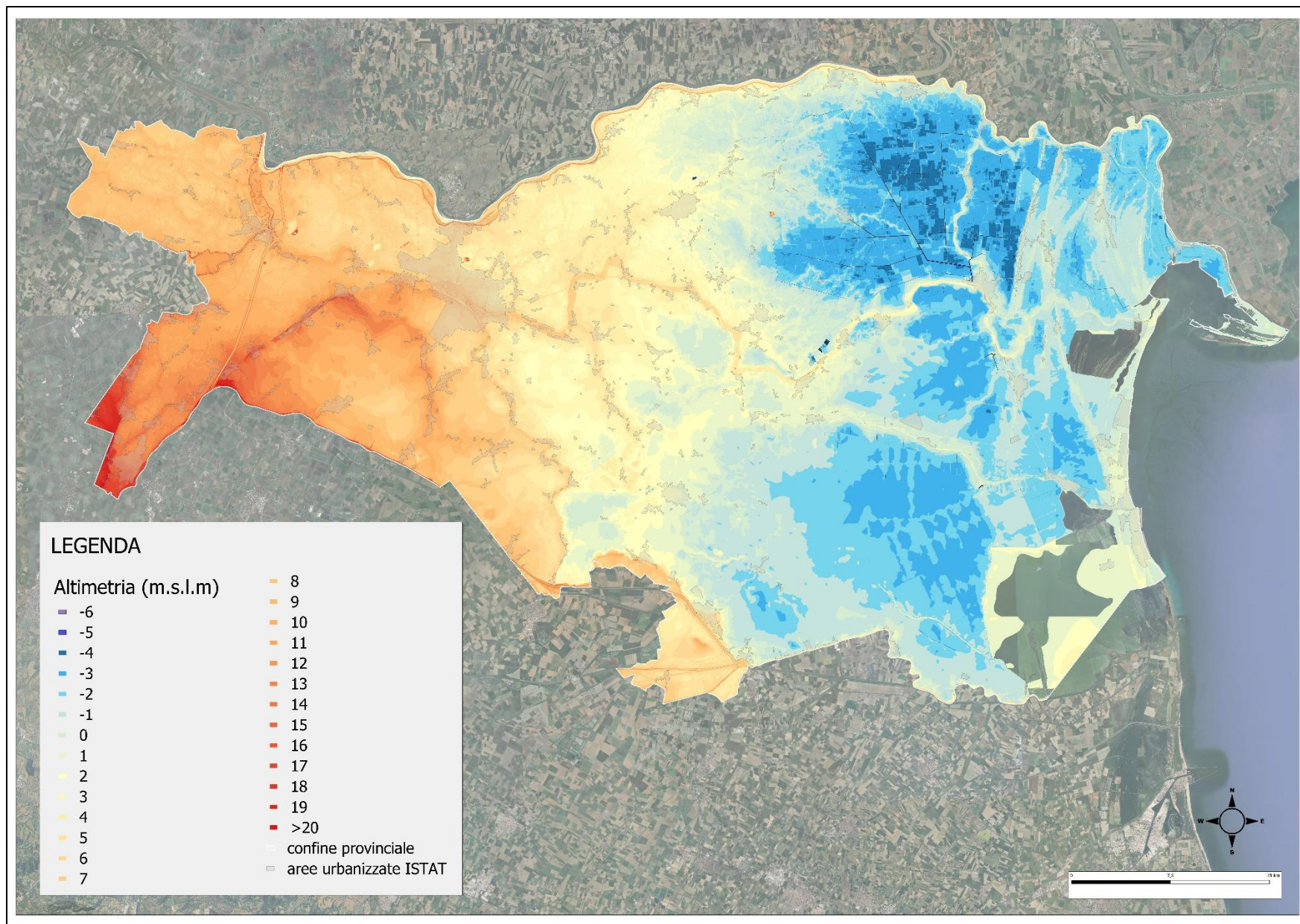


Figura 2.2: carta altimetrica della Provincia di Ferrara ottenuta tramite l'elaborazione ed estrapolazione delle quote dal DTM 5x5 m della Regione Emilia-Romagna. **Elaborazione a cura del Servizio Pianificazione territoriale e urbanistica della Provincia di Ferrara.**

La Pianura Padana deriva dal riempimento del bacino interposto tra due catene ad opposta vergenza: le Alpi a nord e l'Appennino settentrionale a sud. La produzione di grandi quantità di sedimenti sciolti dovuta all'erosione di queste due catene montuose, accumulandosi per spessori di diverse migliaia di metri, ha dato origine al riempimento che oggi costituisce la più vasta pianura italiana. La parte più superficiale, mediamente le prime centinaia di metri dalla superficie, è il risultato dell'attività deposizionale dei numerosi corsi d'acqua presenti nel territorio; la deposizione di tipo fluviale ha avuto come conseguenza diretta una estrema eterogeneità granulometrica dei sedimenti, sia verticale che orizzontale.

Dal punto di vista geologico-strutturale, l'evoluzione della Pianura Padana è strettamente connessa alla tettonica compressiva che ha interessato sia il settore subalpino che l'Appennino.

In particolare, l'Appennino settentrionale e la Pianura Padana, pur essendo due ambienti geomorfologici ben distinti, sono strettamente correlati; il fronte della catena appenninica non coincide con il limite morfologico catena – pianura, ma è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi sepolte dai sedimenti quaternari padani (Pieri e Groppi, 1981), così come rappresentato nello schema tettonico riportato in [Fig. 2.3](#). Il vero fronte appenninico, circa all'altezza del Po, sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta ([Fig. 2.3 – 2.4](#), Boccaletti et al., 2004). I diversi processi tettonici hanno dato luogo alla formazione di gruppi di pieghe e ad un fitto sistema di faglie con direzione NNW – SSE, WNW – ESE e N – S, portando alla suddivisione dell'area padana in settori caratterizzati da pieghe e sovrascorrimenti, le quali delimitano aree di bacino e di alto locale, contraddistinte da una diversa evoluzione. Più in particolare, l'area padana orientale è composta, da nord a sud, dalle seguenti zone geologicamente distinte:

- la monoclinale padano-veneta;
- la dorsale dell'arco ferrarese, che rappresenta il locale fronte dell'Appennino settentrionale;
- il fronte delle pieghe romagnole;
- il fronte delle pieghe pedeappenniniche.

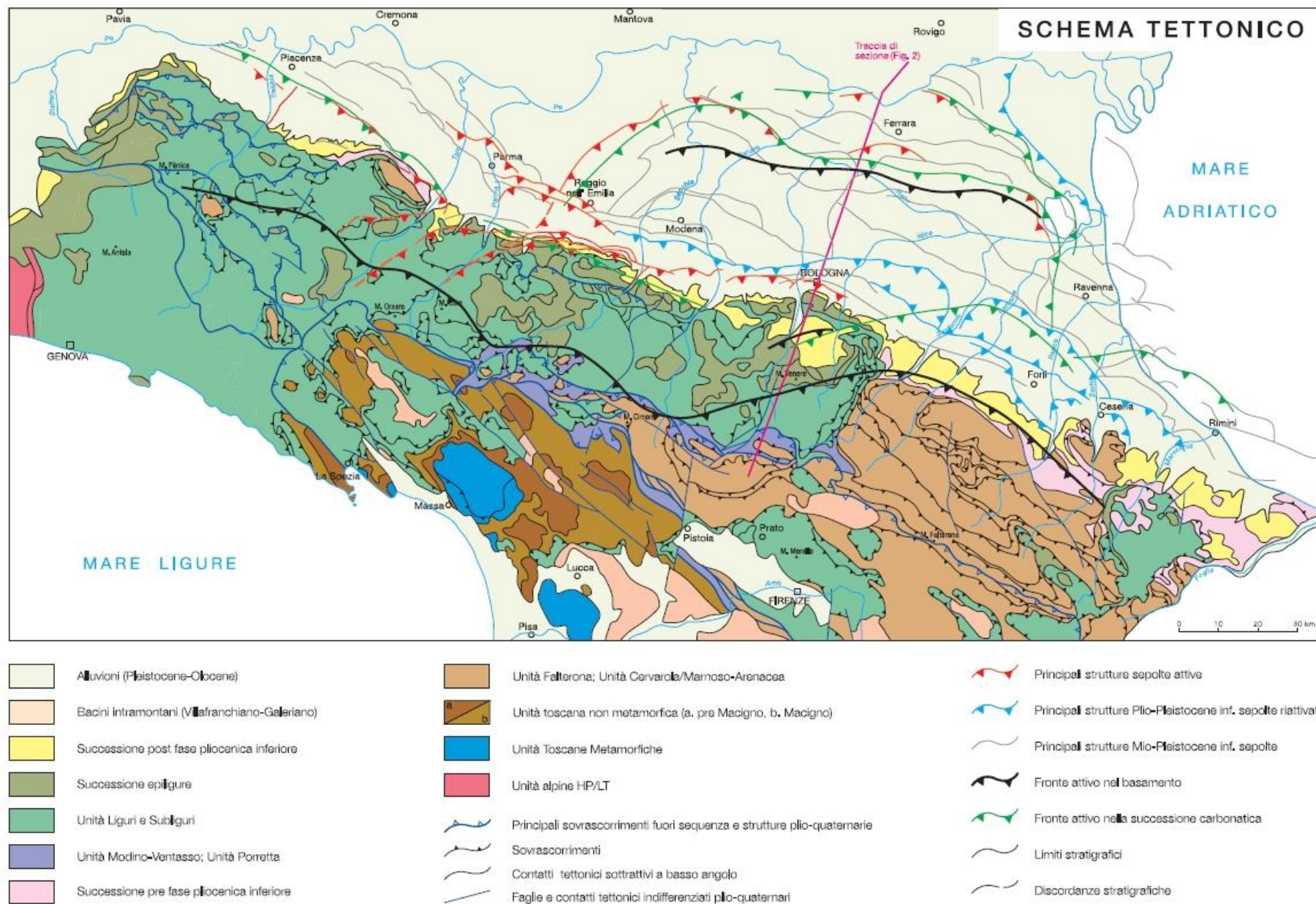


Figura 2.3: schema tettonico dell'Appennino Emiliano-Romagnolo e aree limitrofe (da Boccaletti et al., 2004).

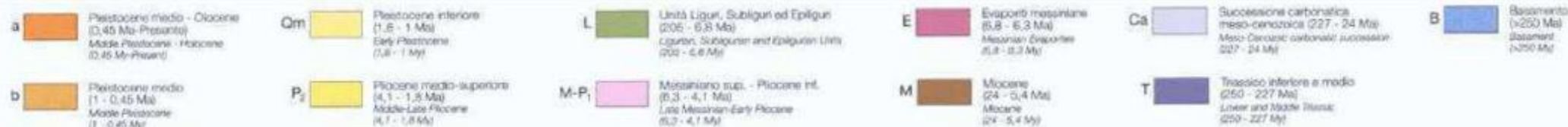
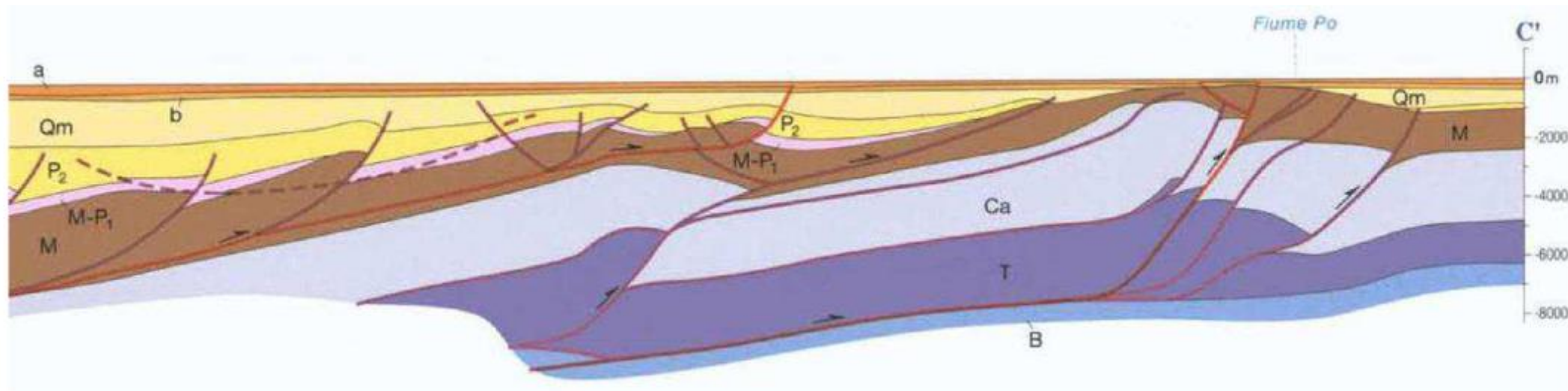


Figura 2.4: particolare della sezione geologica profilo C-C' riportato in Fig. 2.4 (da Boccaletti et al., 2004).

L'arco delle pieghe ferraresi ([Fig. 2.3](#)) è affiancato, verso il mare, dall'arco delle pieghe adriatiche, mentre nella parte interna, meridionale, alle pieghe ferraresi e adriatiche si addossa a sua volta l'arco di quelle romagnole. Le fasi tettoniche che si sono succedute dal Burdigaliano (circa 15 - 20 milioni di anni fa) al Pleistocene (che ha inizio 2,58 milioni di anni fa e termina convenzionalmente 11.700 anni fa) hanno portato a successive riprese dei piegamenti ed alla formazione di lineamenti paleogeografici variabili in successione spazio-temporale e quindi all'instaurarsi di sequenze alternate di ambienti deposizionali marini, costieri, deltizi e lagunari in relazione a locali processi di sollevamento e subsidenza.

Nel Pliocene medio (circa tra 5,3 e 2,5 milioni di anni fa) si assistette ad un periodo di forte subsidenza che continuò sino a tutto il Quaternario inferiore.

Nel Quaternario recente la sedimentazione e la tettonica hanno prevalso sulla subsidenza e di conseguenza, in connessione con le regressioni marine provocate dalle glaciazioni, i depositi continentali si andarono a sovrapporre a quelli marini; si ebbe poi una nuova fase trasgressiva in cui ci fu l'arretramento della linea di costa di oltre venti chilometri alla quale seguì l'ultima regressione marina, sviluppata in più fasi, durante la quale si ebbe un progressivo spostamento della linea di costa verso est, sino a raggiungere l'odierno assetto geomorfologico. La pluralità degli ambienti deposizionali del plioquaternario ha fatto sì che il territorio ferrarese sia caratterizzato dall'alternanza di livelli sabbiosi, limosi ed argillosi o da miscele binarie e ternarie di tali litotipi ([Fig. 2.5](#)).

L'assetto strutturale dei sedimenti plio-quaternari è caratterizzato da anticlinali e sinclinali ([Fig. 2.6-2.7](#)), dal cui andamento dipende lo spessore dei sedimenti plio-quaternari, per esempio il tetto della successione pre-pliocenica tra il Mezzano e Casal Borsetti è a 2800 metri, mentre tra Longastrino ed il Mezzano meridionale, dove c'è un alto strutturale, è a 800 metri, mentre tra Comacchio e Porto Garibaldi, a causa di una forte subsidenza di origine tettonica, lo spessore dei depositi plio-quaternari varia tra 3200 e 4800 metri.

Per quanto riguarda la geologia di dettaglio dell'area ferrarese, ad oggi non è ancora disponibile, per l'intero territorio provinciale, la cartografia geologica nazionale (progetto CARG a scala 1:50.000); tuttavia, informazioni sulla stratigrafia e tettonica sono desumibili da altri studi specifici quali:

- “Risorse idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna” (RER & ENI-Agip, 1998);
- “Carta geologica di pianura dell'Emilia-Romagna alla scala 1:250.000” (RER, 1999);
- “Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara” (Molinari et al., 2007) di cui si riporta una sezione idrostratigrafica che evidenzia l'alto strutturale di Casaglia in [Fig. 2.6](#);

- “Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna” (Boccaletti et al., 2004; Martelli et al., 2017);
- “Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l’emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di Maggio-Giugno 2012” – ordinanza commissariale n. 70/2012 (Martelli et al. 2013) da cui è tratta la sezione in [Fig. 2.7](#).

Di seguito viene riportata la carta litologica di superficie ([Fig. 2.5](#)), derivata dalla precedente carta litologica del PTCP. Nei riquadri in basso vengono riportate, con sfumature del rosso e del blu, rispettivamente le mappe raffiguranti le isobate della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) e del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI).

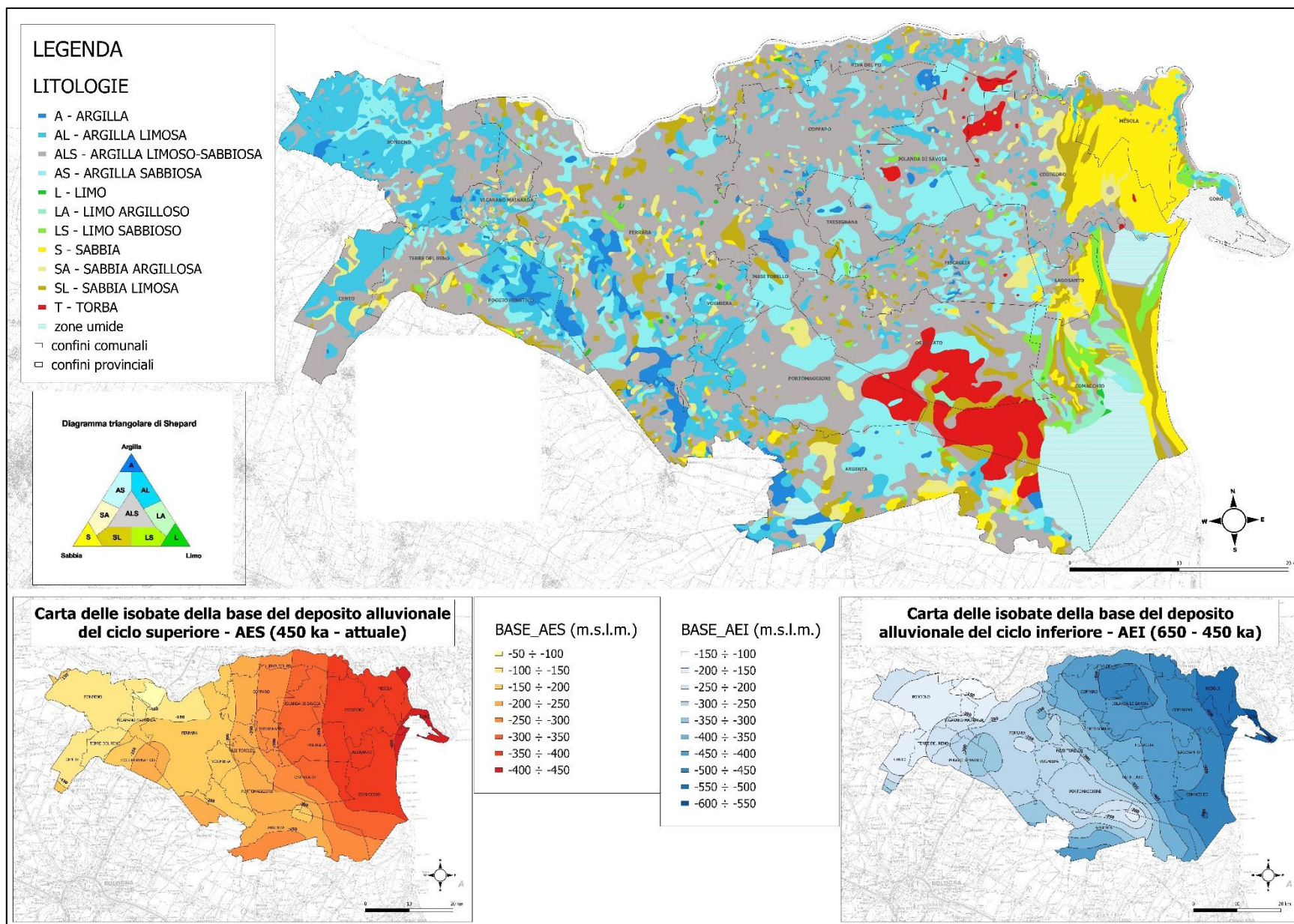


Figura 2.5: carta litologica della Provincia di Ferrara. Vengono inoltre riportate le carte della base dell'AEI (a destra) e dell'AES (a sinistra) in m.s.l.m. *Elaborazione a cura del Servizio Pianificazione territoriale e urbanistica della Provincia di Ferrara.*

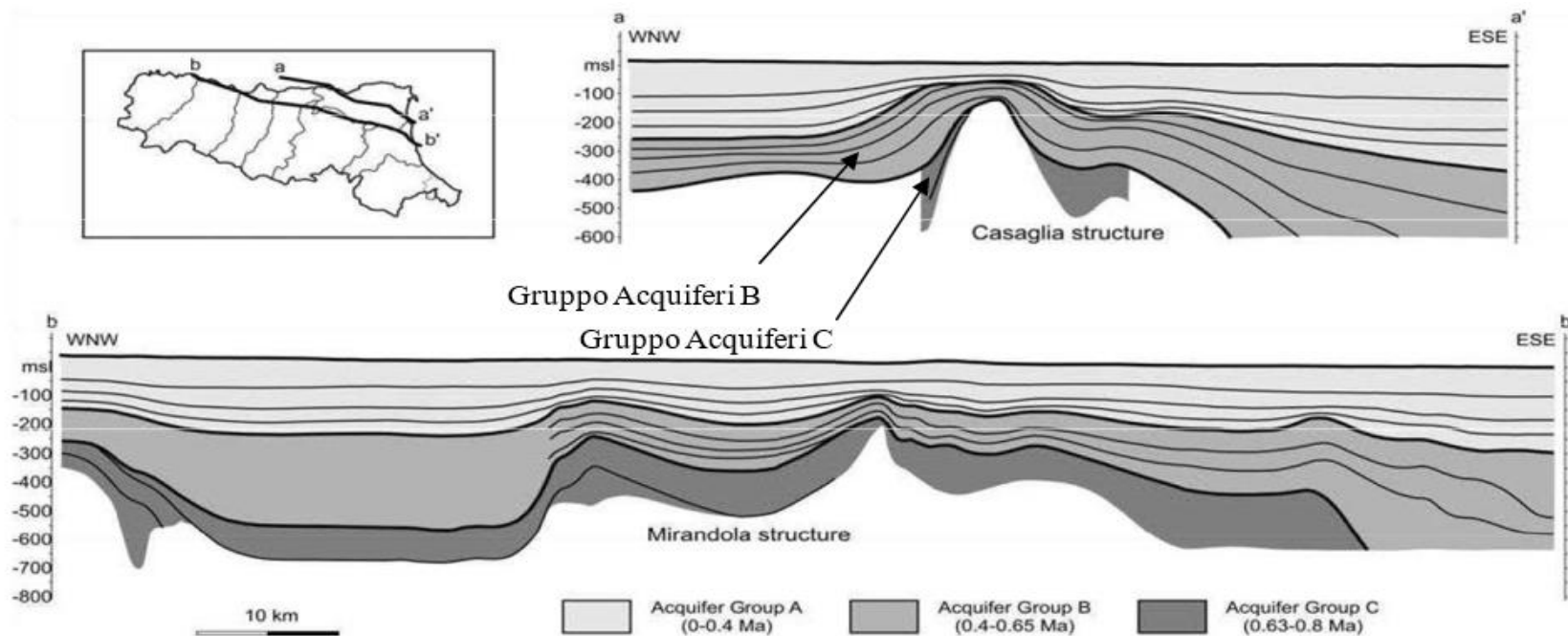


Figura 2.6: Sezioni idrogeologiche in direzione NW-S. a –a' evidenzia la struttura di Casaglia (Ferrara) e b-b' la struttura di Mirandola che lambisce la parte meridionale della Provincia di Ferrara. Modificato dopo Pieri e Groppi, 1981; Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998.

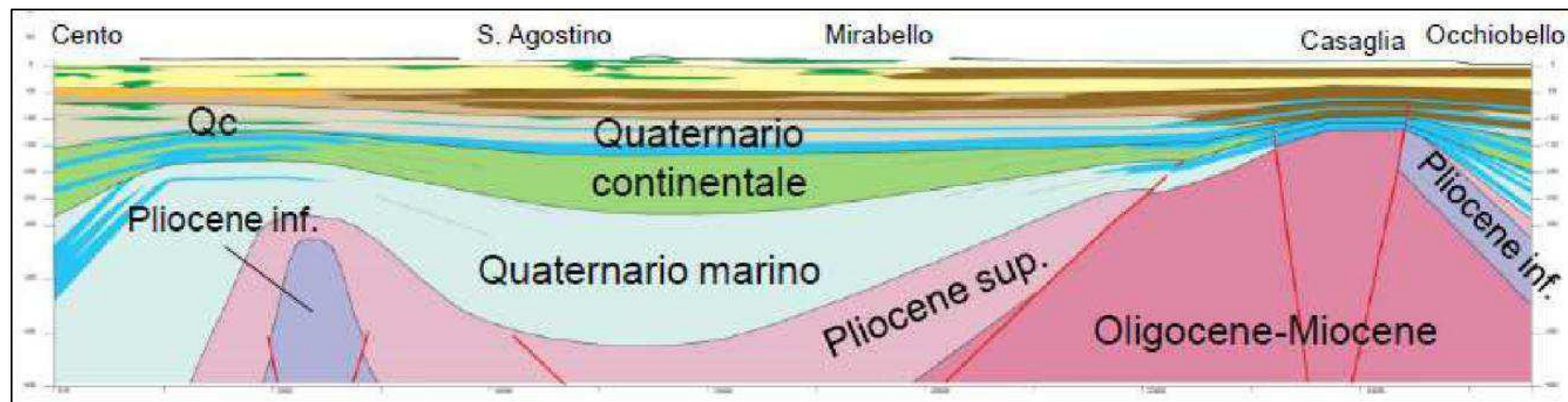


Figura 2.7: Sezione geologica (esagerazione scala verticale x 12.5) orientata circa Sud-Nord (da Martelli et. al., 2013).

Da un punto di vista geomorfologico, l'evoluzione della pianura ferrarese è avvenuta interamente nel periodo olocenico, ossia nei millenni successivi all'imponente risalita del mare, dopo l'ultima glaciazione.

Gli agenti di tale evoluzione sono stati i fiumi, prevalentemente in fase di sedimentazione, nonché il mare e il vento, che hanno ridistribuito lungo la costa i sedimenti fluviali e, come ultimo nel tempo, l'uomo (ultimi due millenni). Tra i fattori che hanno avuto grande influenza va citata la subsidenza, fortemente attiva in questa regione, prodotta sia dallo spontaneo costipamento dei sedimenti incoerenti (limi, argille e torbe) causato dal peso di quelli sovrastanti e dai movimenti del substrato roccioso, sia da cause antropiche quali l'emungimento di acque sotterranee o di gas. Altro fattore determinante è stato la variabilità delle condizioni climatiche che hanno caratterizzato l'Olocene: i periodi freddi e piovosi hanno infatti prodotto frequenti esondazioni e mutamenti del corso dei fiumi, nonché rapidi accrescimenti degli apparati deltizi.

Il territorio comprende, in effetti, gran parte dell'area che è stata sede delle divagazioni e delle foci del Po nell'Olocene; i tratti terminali del Po hanno mutato spesso la loro posizione, catturando talora quelli di vari torrenti appenninici, e gli apparati deltizi hanno costruito la fascia più orientale della provincia, rubando spazio al mare (Castiglioni, 2001).

Le principali strutture geomorfologiche presenti nel nostro territorio e rappresentate nella “Carta geomorfologia della Provincia di Ferrara”, riportata di seguito ([Fig. 2.9](#)), sono le seguenti:

- i paleoalvei principali e secondari;
- le conoidi di rotta o di esondazione;
- i principali cordoni litoranei affioranti, ossia ancora riscontrabili sul terreno;
- i principali cordoni litoranei sepolti da materiali alluvionali depositatisi dopo la loro formazione.

I paleoalvei principali corrispondono agli antichi alvei fluviali abbandonati e sono oggi rappresentati da strisce più elevate del territorio. Nei fiumi della bassa Pianura Padana, infatti, è sempre prevalsa l'azione di sedimentazione rispetto a quella erosiva; durante le esondazioni, non essendo gli alvei confinati da arginature, i sedimenti più grossolani, come le sabbie ed i limi, venivano depositati in prossimità dell'alveo, mentre i più fini, come le argille, raggiungevano zone più distali. Questi ultimi sedimenti, molto più compressibili degli altri, con il tempo hanno creato zone di basso morfologico, i cosiddetti “catini interfluviali”. A questo meccanismo si è poi sovrapposta l'azione dell'uomo, il

quale, per evitare le inondazioni, ha rafforzato ed innalzato gli argini dei fiumi “fossilizzando” così la rete idrografica fino a portare alcuni fiumi come il Po, il Reno ed il Panaro, in condizioni di pensilità.

Le conoidi di rotta o di esondazione sono complesse strutture di sedimentazione che si formano a seguito di importanti esondazioni fluviali; sono spesso caratterizzate dalla tipica forma a ventaglio e presentano grande variabilità litologica sia orizzontale che verticale. Gli esempi nel territorio ferrarese sono innumerevoli. Alcuni dossi fluviali derivano proprio dall'unione di conoidi di esondazione adiacenti.

I cordoni litoranei, infine, corrispondono alle dune di retrospiaggia delle antiche linee di costa. I cordoni più imponenti, in particolare, corrispondono alle linee di costa che hanno mantenuto una posizione stabile per un maggior lasso di tempo, oppure a quelle individuatesi nei momenti in cui il livello marino era più alto. Quelli più antichi, sui quali la subsidenza ha agito più a lungo, si trovano oggi sepolti a qualche metro di profondità. Il rinvenimento di tali forme è piuttosto difficile in quanto l'uomo, negli anni, ha compiuto una intensa azione di “spianamento”. Tra un cordone dunale e l'altro si rinvencono depositi a matrice prevalentemente fine molto ricchi di sostanza organica; tali sedimenti corrispondono ad ambienti deposizionali a bassissima energia che nel caso specifico della nostra provincia corrispondono ad aree un tempo occupate da acque stagne quali paludi.

Per gli elementi geomorfologici riportati nella “Carta Geologico-Tecnica” ci si è dunque basati sulla carta in [Fig. 2.9](#).

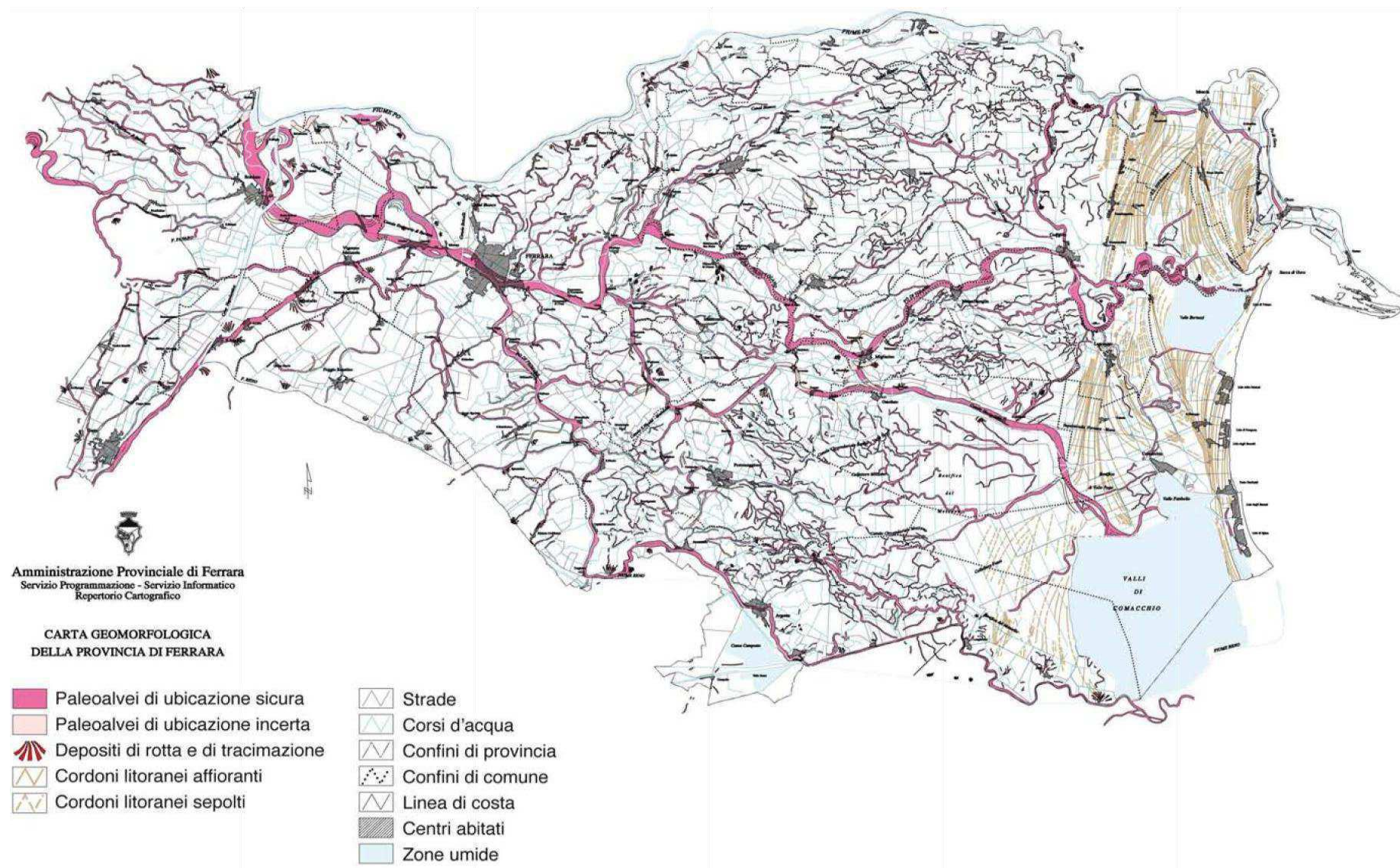


Figura 2.9: Carta Geomorfologica della Provincia di Ferrara. *Elaborazione a cura del Servizio Pianificazione territoriale e urbanistica della Provincia di Ferrara.*

3. SISMOTETTONICA

Gli studi condotti per la carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Boccaletti et al., 2004; Martelli et al., 2017a) ([Fig. 3.1](#)) costituiscono il punto di riferimento principale per quanto riguarda la correlazione tra dati geologico-strutturali, geofisici e sismologici. Consultandola è possibile avere un quadro di insieme e multidisciplinare che permette di fare considerazioni in merito alla pericolosità sismica di una determinata porzione di territorio regionale.

Oltre a questo riferimento, esistono database a livello nazionale che riportano la proiezione in superficie delle sorgenti sismogenetiche e le tracce delle faglie attive (catalogo DISS – ITHACA, [link](#) in sitografia).

Il catalogo DISS 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) individua nel territorio ferrarese, da ovest a est, le seguenti sorgenti sismogenetiche composite capaci di generare forti terremoti ($M > 5.5$) ([Fig. 3.3](#)): la ITCS051 Carpi-Poggio Renatico, considerata capace di generare terremoti di magnitudo maggiore di 6, con meccanismi di thrust ad una profondità compresa tra 2 e 10 km; la ITCS103 Finale Emilia-Mirabello, anch'essa considerata capace di generare terremoti di magnitudo maggiore di 6, con meccanismi di thrust ad una profondità compresa tra 3,5 e 10 km; la ITCS050 Poggio-Rusco-Migliarino, considerata altrettanto capace di generare terremoti di magnitudo maggiore di 6, con meccanismi di thrust a profondità compresa tra 1 e 8 km; la ITCS012 Malalbergo-Ravenna, prosecuzione verso sud-est della ITCS 051 e come questa considerata capace di generare terremoti di magnitudo maggiore di 6.0, con meccanismi di thrust, ad una profondità compresa tra 2 e 10 km.

La sequenza sismica di maggio-giugno 2012 ([Fig. 4.3](#)) e l'evento del 17/7/2011 hanno confermato che tutti i fronti principali del settore centrale delle Pieghe Ferraresi, localizzati nella bassa modenese, nell'Oltrepò mantovano, nel Polesine e nella zona occidentale del territorio provinciale sono attivi ([Fig. 3.4](#)).

L'interpretazione delle linee sismiche disponibili mostra che i thrust delle Pieghe Ferraresi si approfondiscono verso sud fino a profondità di almeno 10-12 km, coinvolgendo anche il basamento metamorfico (Argnani et al., 2003; Boccaletti et al., 2004; Fantoni e Franciosi, 2010; Boccaletti et al., 2011).

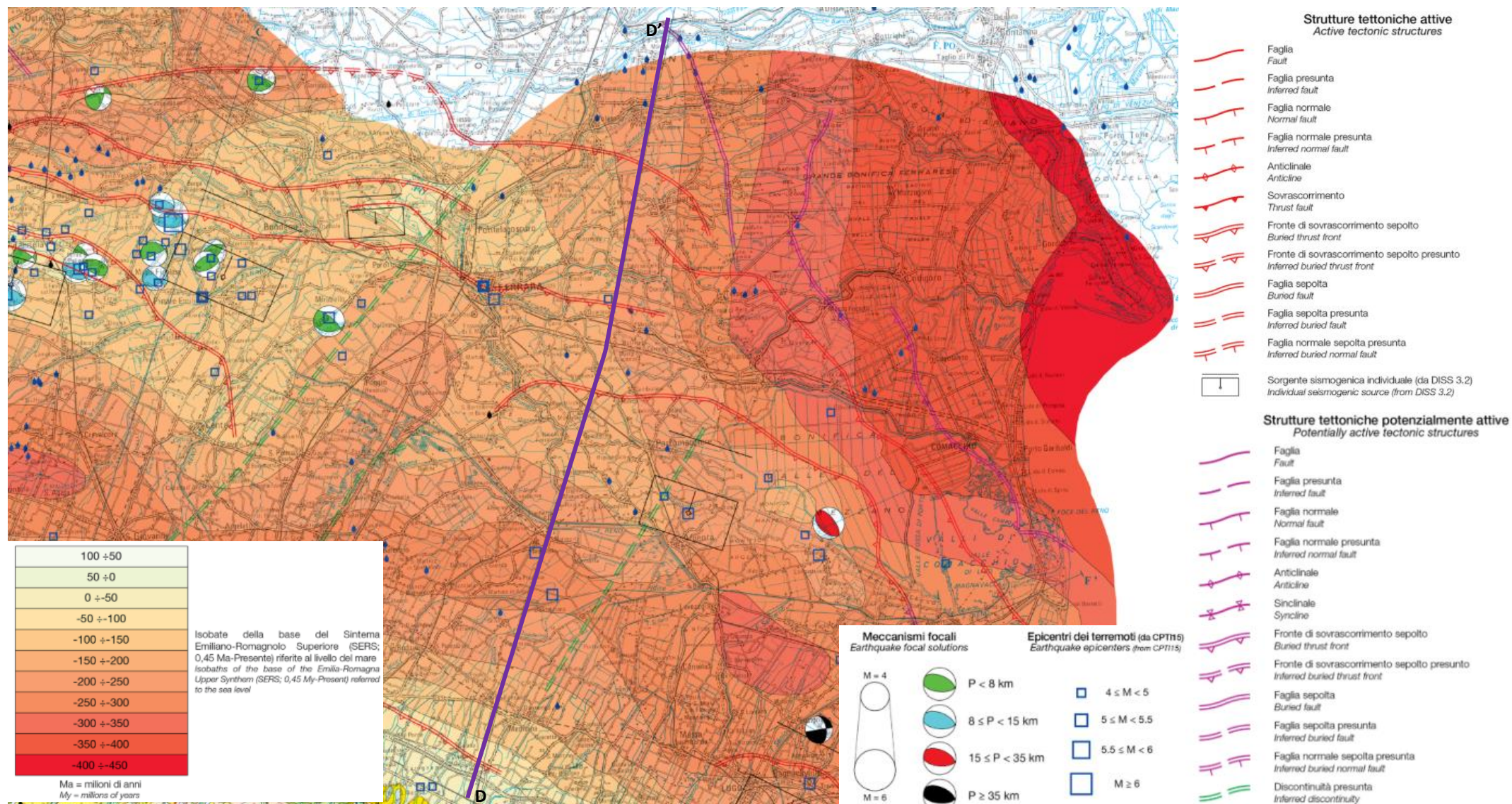


Figura 3.1: stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli et al., 2017a) che interessa il territorio ferrarese.

SEZIONI / CROSS SECTIONS

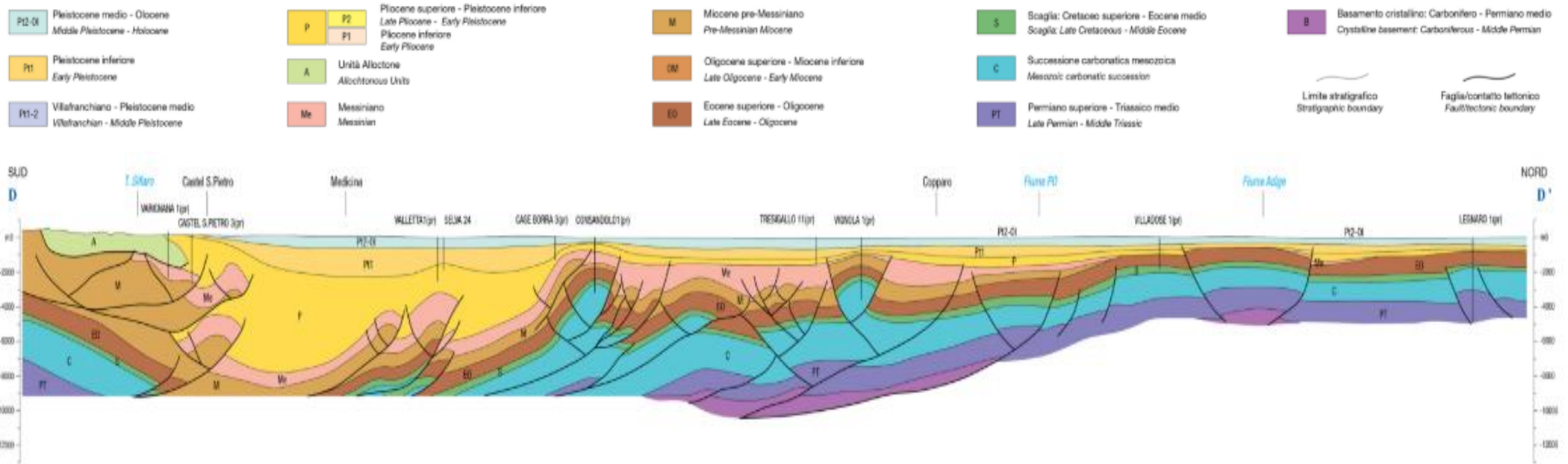


Figura 3.2: sezione sismotettonica D-D' allegata alla carta che attraversa il territorio provinciale ad est di Ferrara, evidenziata in viola in Fig. 3.1.

Sulla base della distribuzione, frequenza ed energia dei terremoti, dei meccanismi di fagliazione e delle caratteristiche geologiche il territorio nazionale è stato suddiviso in zone sismogenetiche. L'attuale zonazione sismogenetica di riferimento a scala nazionale è la ZS9 di Meletti e Valensise, 2004 ([Fig. 3.5a](#)).

Secondo questa zonazione, il settore meridionale del territorio ferrarese ricade nella zona 912, caratterizzata da meccanismi di fagliazione compressivi. La magnitudo massima attesa è pari a 6.14. La restante parte del territorio provinciale non ricade in nessuna zona sismogenetica ma chiaramente risente della sismicità delle zone sismogenetiche adiacenti.

Secondo una zonazione regionale recentemente proposta da Martelli et al., 2017b, il settore compreso in una zona sismogenetica è un po' più ampio; nella [Fig. 3.4b](#) è rappresentato uno stralcio di tale zonazione, in particolare la zona n. 3 denominata "Pieghe Ferraresi", che, comunque, in termini di meccanismi di fagliazione e magnitudo, non presenta sostanziali differenze rispetto alla zona 912 della ZS9 di Meletti e Valensise, 2004.

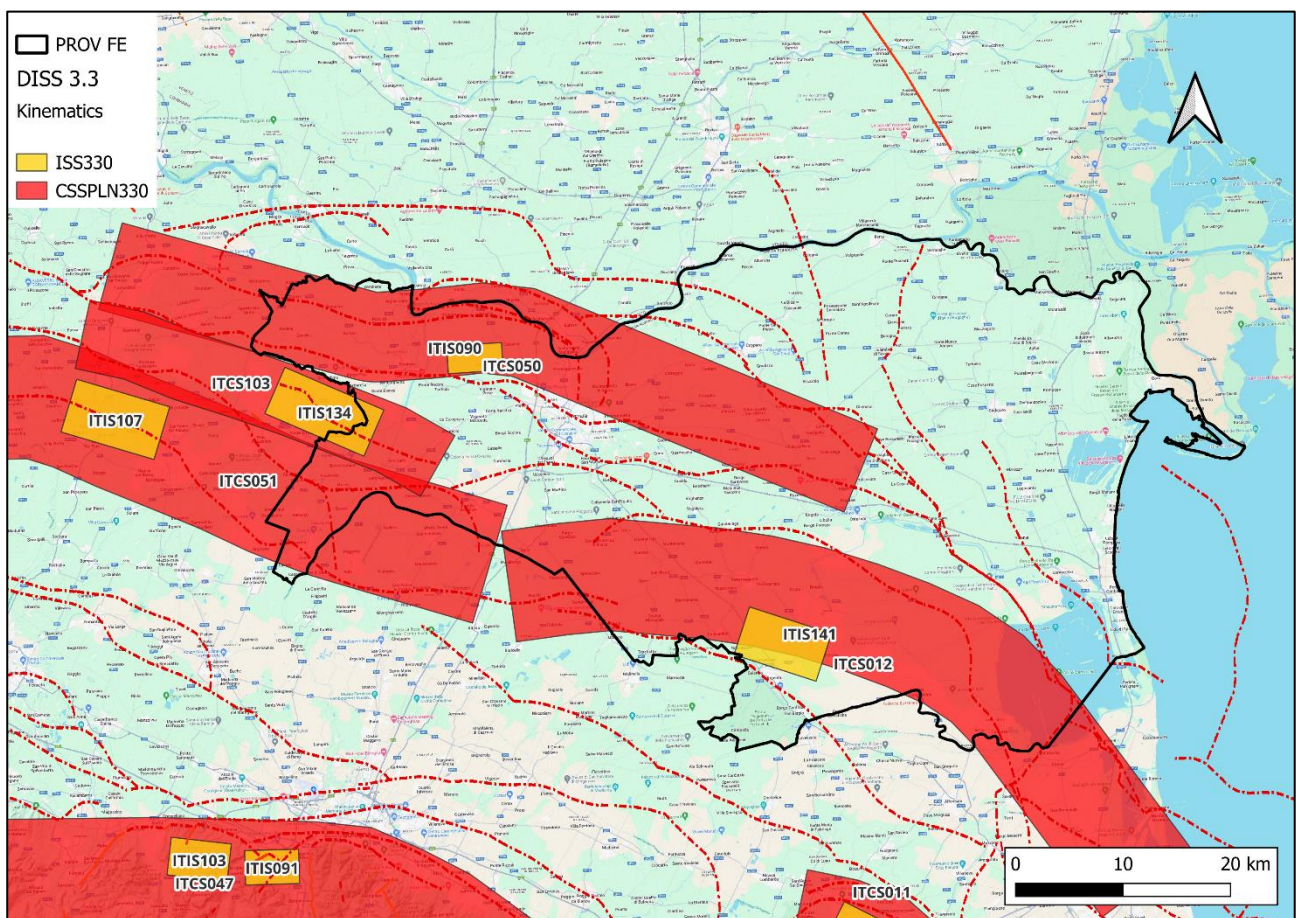


Figura 3.3: in rosso, sono riportate le Sorgenti Sismogenetiche Composite ed in giallo le Sorgenti Individuali tratte dal catalogo DISS, versione 3.3. Vengono inoltre raffigurate le tracce delle faglie attive (thrust sepolti) dal database delle faglie attive e capaci ITHACA.

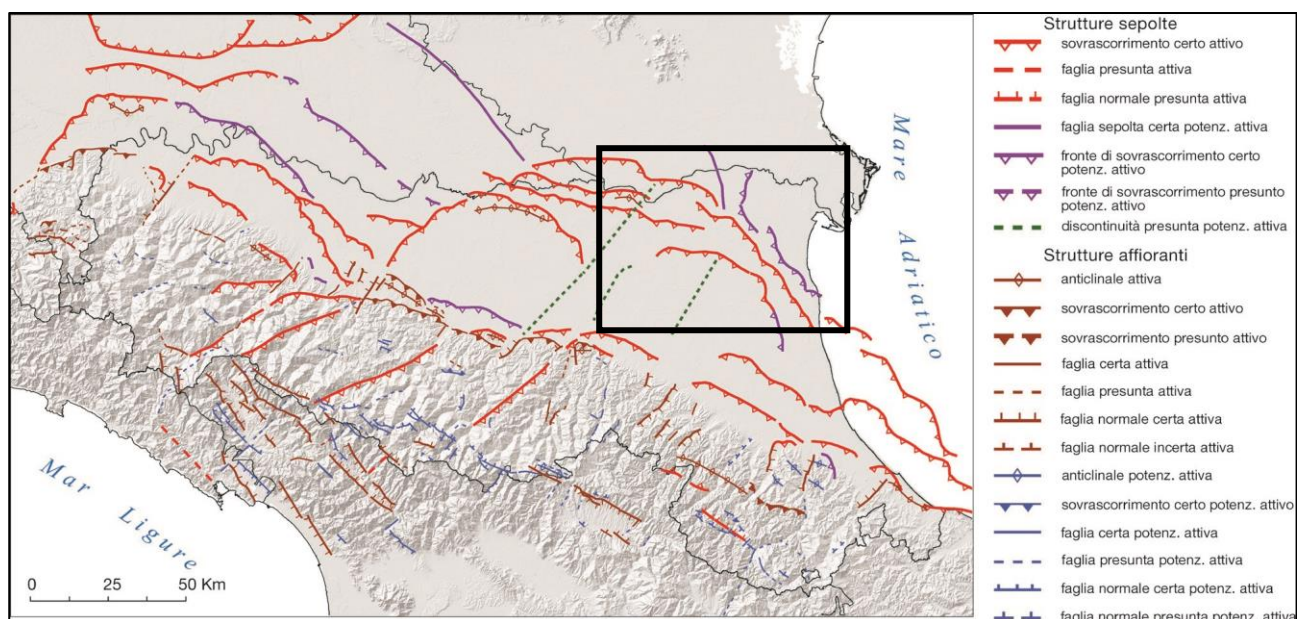


Figura 3.4: Distribuzione delle strutture attive, con zonazione delle aree a maggiore risentimento (Martelli et al., 2017a). Con il riquadro nero si evidenzia la porzione di mappa che interessa il territorio ferrarese.

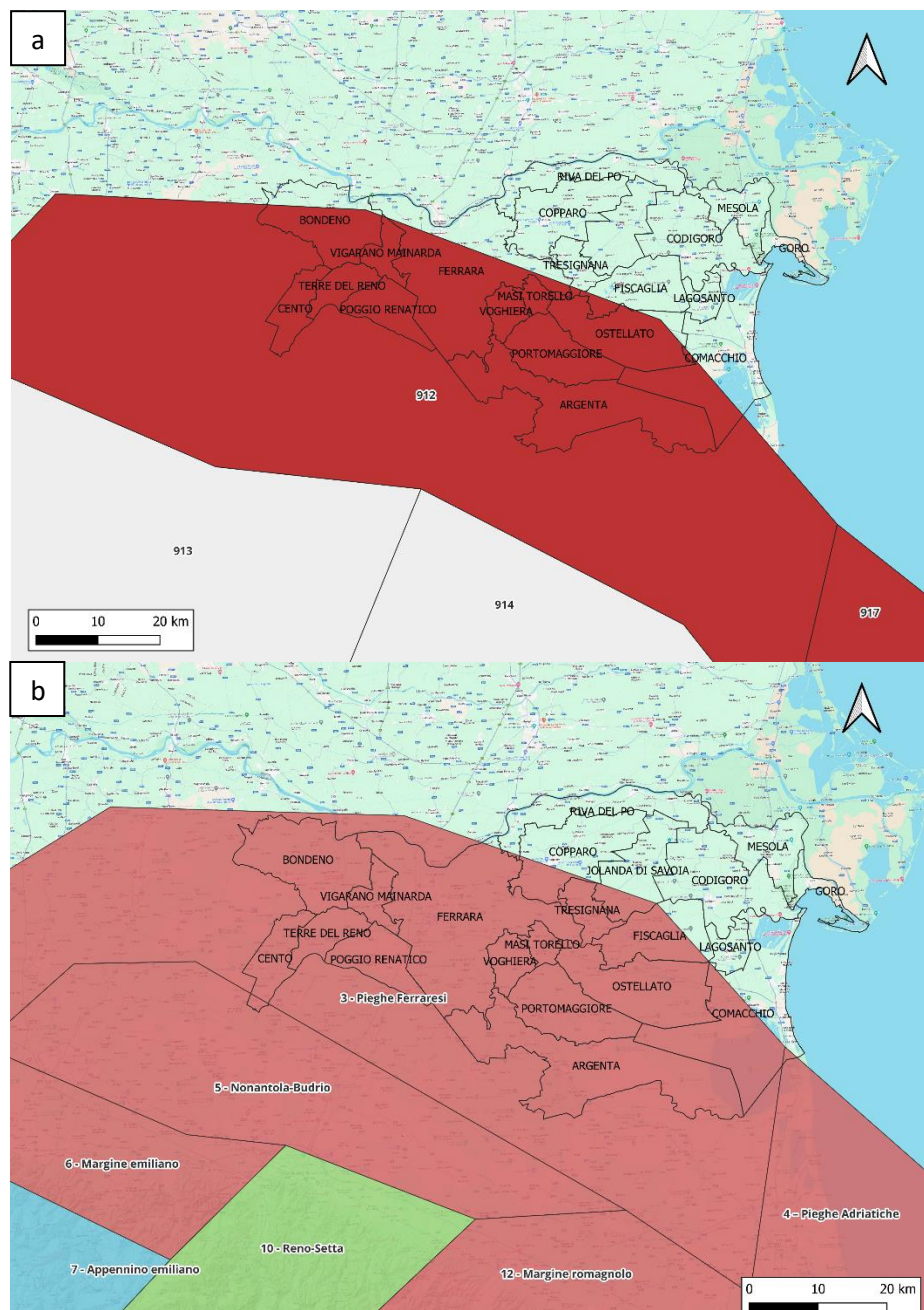


Figura 3.5: a) particolare della zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004); b) particolare della zonazione sismogenetica proposta dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli et al., 2017b).

4. SISMICITA'

Conoscere la storia sismica, ovvero i terremoti del passato, è fondamentale per valutare meglio la pericolosità sismica di un'area.

Nella [Tabella 4.1](#) sono indicati i terremoti che hanno provocato risentimenti di intensità macrosismica almeno pari al VI grado, generalmente considerata la soglia di intensità oltre la quale si osservano danni diffusi.

Tabella 4.1: elenco dei principali terremoti che, dall'anno 1000, hanno provocato risentimenti $I \geq VI$ in Provincia di Ferrara (da Rovida et al., 2022).

Intensità max osservata in Prov. FE	Anno	Mese	Giorno	Area epicentrale	Magnitudo
6	1222	12	25	Bresciano-Veronese	5,68
7	1234	3	20	Ferrara	5,1
7	1285	12	13	Ferrara	5,1
6	1339	11	16	Ferrara	4,63
6	1409	8	17	Ferrara	4,63
6-7	1410	5	9	Ferrara	4,86
7	1411	1	9	Ferrara	5,1
7	1425	8	10	Ferrarese	4,63
6	1505	1	3	Bolognese	5,62
6	1511	3	26	Friuli-Slovenia	6,32
6	1536	8	17	Appennino settentrionale	5,12
6-7	1561	11	24	Ferrarese	4,4
8	1570	11	17	Ferrarese	5,44
6	1620	6	22	Ravennate	4,86
8-9	1624	3	19	Argenta	5,43
6	1695	2	25	Asolano	6,4
6-7	1743	5	29	Ferrara	4,86
6-7	1781	7	17	Faentino	5,61
6-7	1787	7	16	Ferrara	4,4
6-7	1787	7	26	Ferrara	4,86
7	1796	10	22	Emilia orientale	5,45
6-7	1895	3	23	Comacchio	4,65
6	1895	7	30	Comacchio	4,47
7	1898	1	16	Romagna settentrionale	4,59
7	1898	3	9	Romagna settentrionale	4,59
6	1909	1	13	Emilia-Romagna orientale	5,36
6	1914	10	27	Lucchesia	5,63
6	1986	12	6	Ferrarese	4,43
6	2012	5	20	Pianura emiliana	6,09
6	2012	5	29	Pianura emiliana	5,9

Oltre ai terremoti che hanno origine nel sottosuolo ferrarese, come si vede dalla [Tabella 4.1](#) numerose sono anche le scosse con origine fuori dal territorio provinciale che hanno provocato risentimenti importanti anche nel territorio ferrarese, tra cui la più recente è la sequenza sismica del maggio 2012. In ogni caso, i maggiori effetti sono riconducibili ad eventi locali, imputabili a movimenti delle pieghe sepolte, probabilmente amplificate dalla natura dei materiali sovrastanti.

Analizzando i dati, occorre tener presente che la ricostruzione dell'impatto di ogni singolo terremoto dipende sia dal livello di approfondimento delle ricerche, in relazione al contesto antropico in cui si è verificato un evento (densità e rilevanza degli insediamenti abitati interessati), sia da fattori più propriamente fisici (condizioni di sito). In aggiunta alle considerazioni su riportate bisogna inoltre ricordare che andando indietro nel tempo si incontrano notevoli difficoltà nel verificare l'attendibilità dei dati raccolti.

In [Fig. 4.1a](#) sono riportati i principali terremoti che hanno interessato il territorio provinciale di ferrara (da Rovida et al., 2022).

In [Fig. 4.1b](#) sono riportati i dati strumentali, vale a dire quelli derivati dalle registrazioni di terremoti, estratti dal catalogo ISIDe (ISIDe Working Group, 2007), che comprende i terremoti registrati dalle reti nazionali di monitoraggio sismico a partire dal 1981.

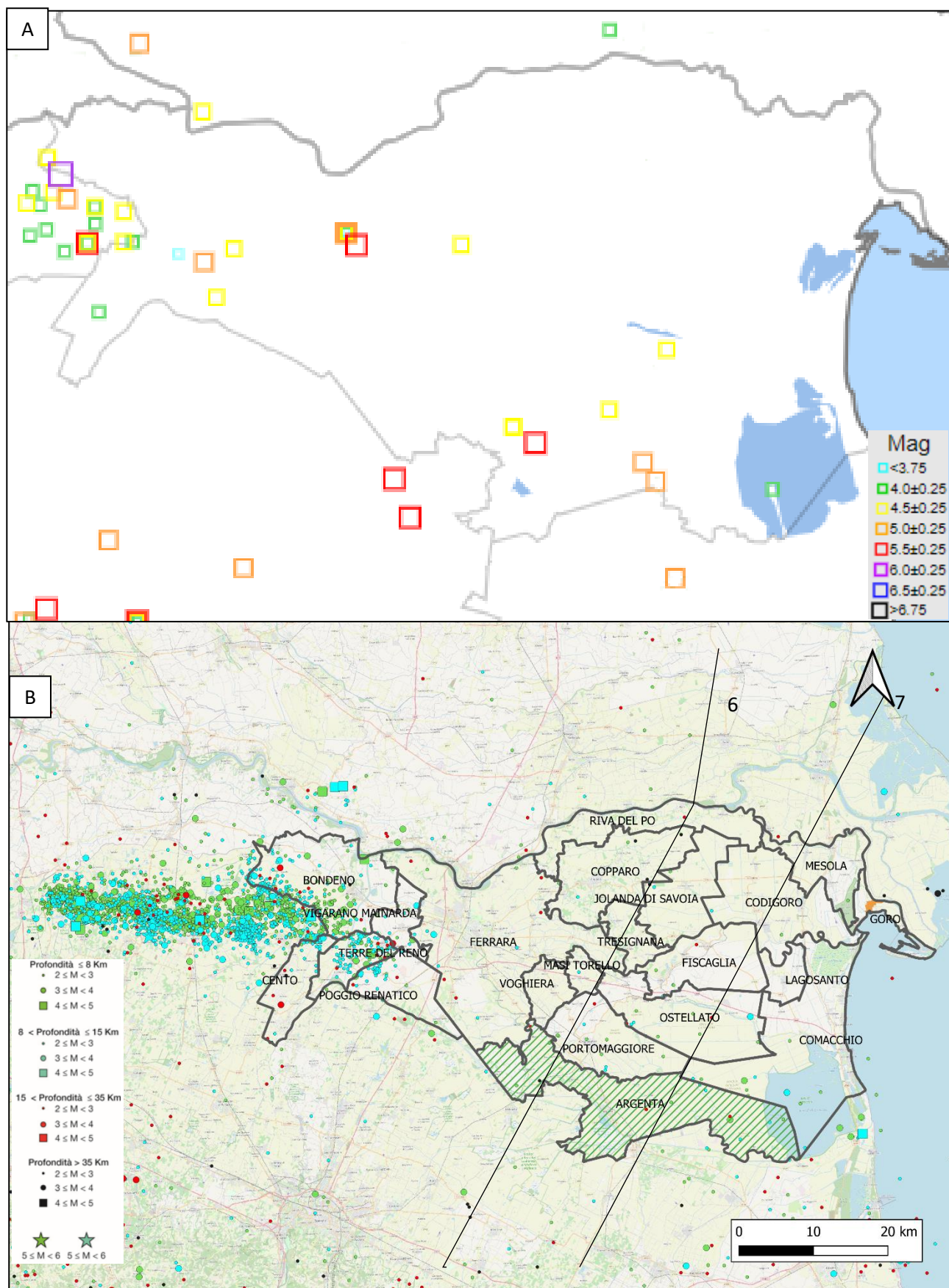


Figura 4.1: a) estratto dal catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15 – Rovida et al., 2022). b) Elaborazione e classificazione dei terremoti dal sito delle misure strumentali di INGV (Iside Working Group, 2007). Vengono infine riportate le tracce delle due sezioni in Fig. 4.2.

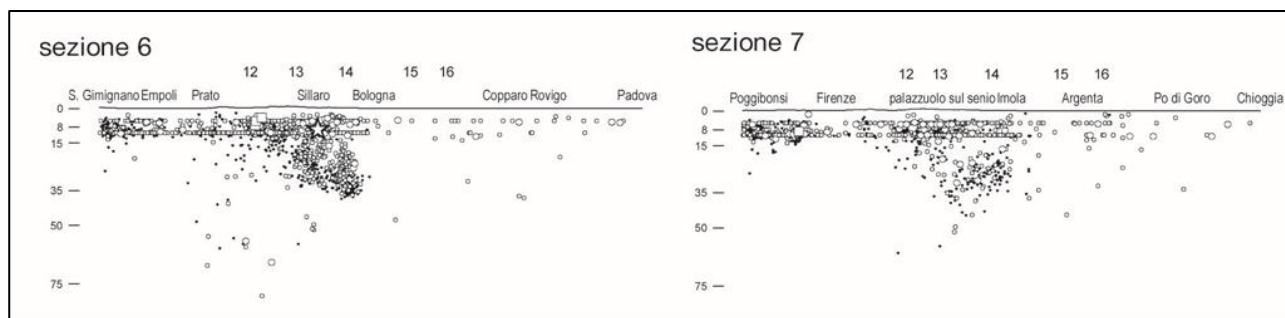


Figura 4.2: sezioni sismologiche tratte da Martelli et al., 2017a, le cui tracce sono riportate in Fig. 4.1.

Dalla [Fig. 4.1](#) si nota una concentrazione di eventi recenti nelle zone sovrastanti il settore occidentale delle Pieghe Ferraresi

Le [Fig. 4.1b](#) e [4.2](#) mostrano una distribuzione degli ipocentri diffusa nei primi 15 km, con una concentrazione a profondità comprese tra 5 e 10 km, e sporadici eventi a profondità maggiori (talora anche oltre 50 km).

Per quanto riguarda i dati sui meccanismi focali ([Fig. 4.3](#) e [Tab. 4.2](#)), che permettono di capire il meccanismo di fagliazione prevalente in una determinata area e, di riflesso, le caratteristiche delle strutture tettoniche che generano i sismi, sono stati considerati quelli disponibili nei cataloghi RCMT e TDMT dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ai [link](#) riportati in sitografia.

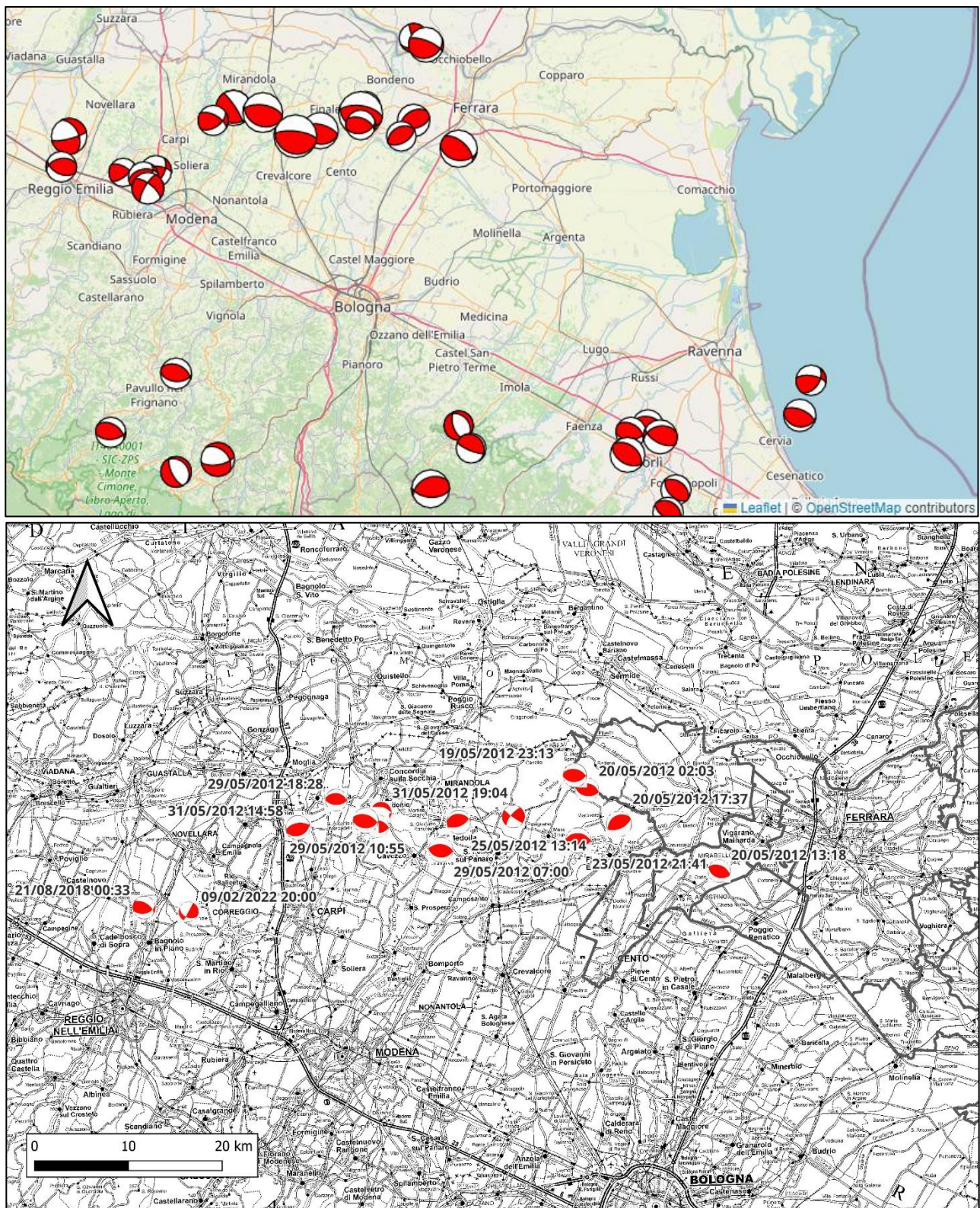


Figura 4.3: meccanismi focali che insistono sul territorio ferrarese e aree limitrofe estratti dai cataloghi RCMT (in alto) e TDMT (in basso) di INGV.

Tabella 4.2: elenco e caratteristiche dei meccanismi focali che interessano la Pianura ferrarese e le aree limitrofe, estratti dai cataloghi RCMT e TDMT di INGV.

ID	date	Lat.	long	Depth (km)	region	scalar moment	strike	dip	rake	strike	dip	rake	Mw
1	06/05/2000	44.14	11.97	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.030	287	33	64	137	61	106	4.1
2	08/05/2000	44.30	11.90	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.120	326	33	85	152	57	93	4.6
3	10/05/2000	44.30	11.90	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.240	309	43	97	120	47	84	4.8
4	11/05/2000	44.34	11.91	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.460	303	46	117	86	50	64	4.2
5	12/05/2000	44.35	11.95	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	4.390	282	43	85	108	47	94	4.4
6	18/06/2000	44.76	10.73	5.00	NORTHERN-ITALY-- -----	4.970	308	68	-161	210	73	-23	4.4
7	08/06/2002	44.34	10.64	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.570	301	45	116	86	51	66	4.2
8	18/06/2002	44.44	10.80	33.00	NORTHERN-ITALY-- -----	3.760	293	44	103	95	48	78	4.3
9	09/05/2007	44.80	10.52	20.00	NORTHERN ITALY	2.810	258	45	63	115	51	115	4.2
10	01/03/2008	44.35	11.49	10.00	NORTHERN ITALY	1.440	318	32	-108	160	60	-79	4.0
11	05/04/2009	44.33	11.98	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.540	257	37	55	118	60	113	4.7
12	17/07/2011	45.01	11.41	8.10	NORTHERN-ITALY-- -----	2.200	66	26	47	292	71	108	4.8
13	25/01/2012	44.85	10.54	33.00	NORTHERN-ITALY-- -----	3.350	335	46	-16	76	79	-135	5.0
14	19/05/2012	44.90	11.26	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	3.370	85	32	50	310	66	112	4.3
15	20/05/2012	44.89	11.25	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.810	109	30	99	279	60	85	6.1
16	20/05/2012	44.86	11.15	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	4.600	103	27	89	284	63	91	5.1
17	20/05/2012	44.83	11.49	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	7.250	100	37	64	312	57	109	5.2
18	20/05/2012	44.88	11.38	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	0.760	235	43	72	79	50	106	4.5
19	21/05/2012	44.85	11.35	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.930	243	37	92	60	53	89	4.1
20	23/05/2012	44.87	11.25	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.960	77	43	63	292	52	113	4.1
21	29/05/2012	44.85	11.09	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.070	110	20	103	276	71	85	6.0
22	29/05/2012	44.90	10.94	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.360	105	21	94	281	69	88	4.7
23	29/05/2012	44.89	11.01	6.80	NORTHERN-ITALY-- -----	2.420	112	32	101	279	59	83	5.5
24	03/06/2012	44.90	10.94	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.680	92	16	37	326	81	103	4.9
25	06/06/2012	44.43	12.35	25.60	NORTHERN-ITALY-- -----	2.670	35	46	36	278	65	130	4.2

26	12/06/2012	44.88	10.89	15.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.370	56	52	39	299	60	135	4.2
27	20/06/2017	44.31	11.52	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	2.060	327	17	124	112	76	80	4.2
28	21/08/2018	44.79	10.67	10.00	NORTHERN-ITALY-- -----	1.010	304	58	151	50	66	36	3.9
29	14/01/2019	44.37	12.32	25.0	NORTHERN ITALY	7.020	99	30	78	292	61	97	4.50
30	09/02/2022	44.78	10.72	7.0	NORTHERN ITALY	2.320	257	48	123	33	51	59	4.18
31	09/02/2022	44.79	10.75	6.0	NORTHERN ITALY	4.350	31	47	38	273	63	130	4.36
32	25/10/2023	45.02	11.38	9.0	NORTHERN ITALY	1.300	64	37	171	161	84	53	4.01

Dai dati della [Fig. 4.3](#) e della [Tab. 4.3](#) si evince che i meccanismi di rottura nel sottosuolo ferrarese sono prevalentemente di tipo compressivo, talora con componente trascorrente, con una direzione di massima compressione orientata circa NNE-SSW, in perfetto accordo anche con i dati di stress attivo dell'area ([link](#) in sitografia).

5. LA PERICOLOSITÀ SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E LA PROGETTAZIONE

5.1. Pericolosità sismica di base

Sulla base delle conoscenze sismologiche e geologiche disponibili, nel 2004 è stata realizzata la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, denominata MPS04 (Gruppo di lavoro MPS, 2004), primo riferimento per le analisi di pericolosità sismica (v. [sitografia](#)). Tale studio fornisce i valori di accelerazione di picco al suolo di riferimento (rigido e pianeggiante, i.e. categoria di sottosuolo A delle NTC, 2018) per vari periodi di ritorno; l'accelerazione di picco su suolo rigido e pianeggiante è considerata il parametro di base per il calcolo dell'azione sismica per la progettazione (v. EuroCode8: Bisch et al., 2012). La versione della MPS04 per periodo di ritorno di 475 anni è stata assunta anche come riferimento per la riclassificazione sismica del territorio (OPCM 3519/2006) e per gli studi di microzonazione sismica. In [Fig. 5.1](#) è mostrata tale mappa per il territorio provinciale e aree limitrofe.

Per la stima dell'effettiva pericolosità sismica al sito, valutazione richiesta sia per la pianificazione urbanistica che per la progettazione al fine di indirizzare le scelte insediative verso le aree a minore pericolosità e/o ridurre la vulnerabilità delle costruzioni, occorre considerare anche i potenziali effetti locali attesi.

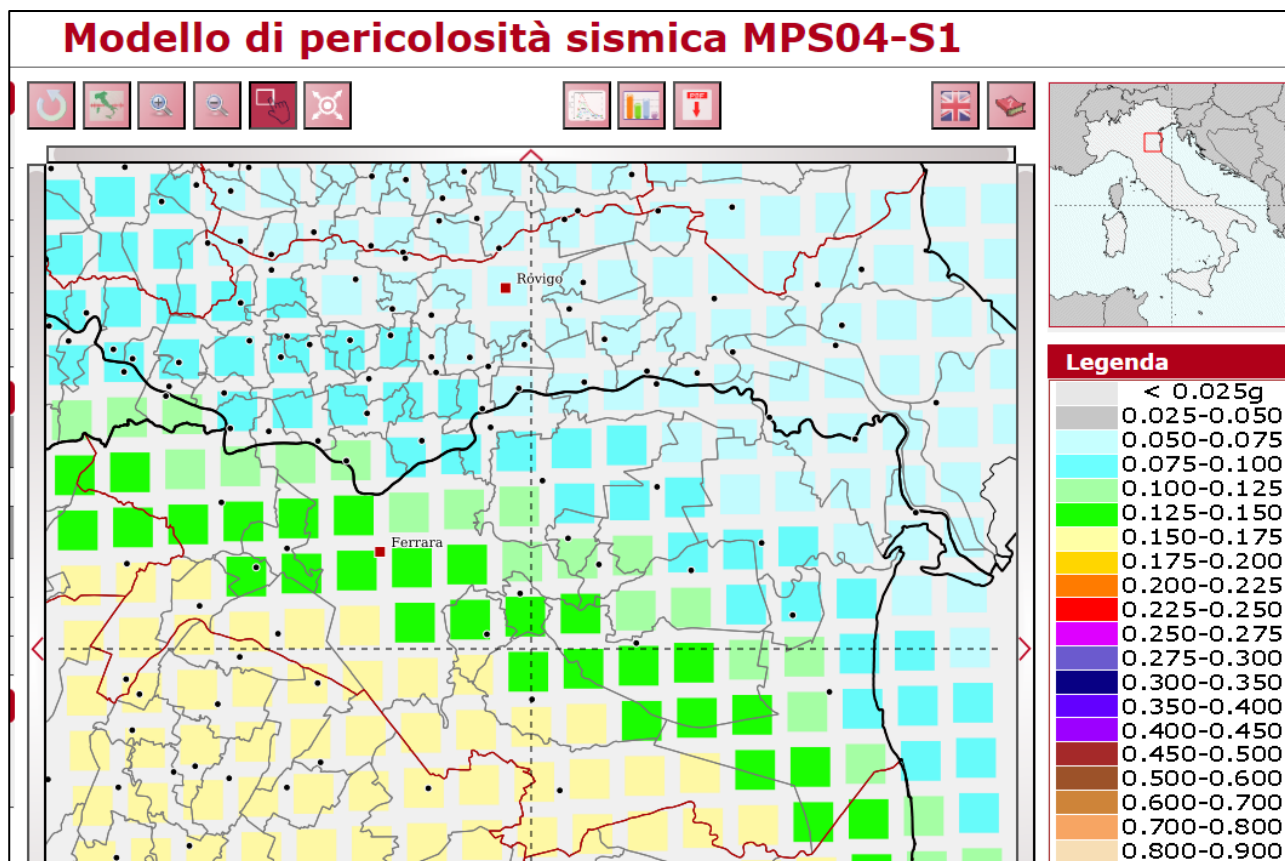


Figura 5.1: estratto della mappa della pericolosità sismica di base (MPS04 -S1), $T_R=475$ anni (Gruppo di lavoro MPS, 2004); i colori indicano le classi di a_g , accelerazione di picco su suolo rigido e pianeggiante, espressa in percentuale dell'accelerazione di gravità g . Link: in sitografia .

5.2. Effetti locali e microzonazione sismica

Il moto sismico può essere notevolmente modificato dalle condizioni geologiche che caratterizzano il sottosuolo e dalla topografia. In particolare, i terreni poco consolidati/addensati (terreni coesivi poco consolidati, depositi di detriti sciolti, ...) e alcune morfologie, sia sepolte che superficiali (rapide variazioni del tetto del substrato e della superficie topografica), possono modificare l'ampiezza, la frequenza e la durata del moto. Ai fini della riduzione del rischio sismico, interessa soprattutto individuare e cartografare tutti quegli elementi del territorio che possono produrre un aumento dello scuotimento. L'amplificazione del moto può anche indurre fenomeni di instabilità quali frane, fenomeni di liquefazione e fratturazione del terreno, con conseguenti cedimenti e spostamenti.

È evidente che la conoscenza della distribuzione sul territorio degli elementi geologici e topografici che possono determinare effetti locali è uno strumento di grande importanza ed efficacia per la riduzione del rischio sismico, in quanto permette di attuare strategie di prevenzione già dalle prime fasi della programmazione territoriale.

Per tali motivi da anni le norme nazionali e regionali richiedono la realizzazione di studi per la definizione della pericolosità locale e la microzonazione sismica del territorio.

In particolare, la microzonazione sismica, ovvero la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento del terreno durante e a seguito di un terremoto, si è rivelata uno dei documenti più chiari di rappresentazione della pericolosità sismica locale, ed è quindi uno strumento potenzialmente di grande efficacia per la prevenzione e mitigazione del rischio sismico, soprattutto se applicata fino dalle prime fasi della programmazione territoriale.

In Emilia-Romagna l'analisi della pericolosità sismica per la programmazione territoriale e la microzonazione del territorio per la pianificazione urbanistica sono regolate da specifiche linee guida fino dal maggio 2007, quando è entrato in vigore il primo atto d'indirizzo ai sensi della normativa urbanistica vigente (DAL n. 112/2007). Questi primi indirizzi sono stati aggiornati nel 2015, con DGR n. 2193, e, a seguito della nuova LR n. 24/2017, con DGR n. 630/2019 e successivamente con DGR n. 476/2021, integrata con DGR n. 564/2021. Tali indirizzi sono vincolanti per la formazione dei piani territoriali e urbanistici e la microzonazione sismica è riferimento necessario per la ValSAT preventiva alle singole scelte del piano.

Esiste ormai un generale accordo su quali depositi e forme del paesaggio, durante o a seguito di un terremoto, possano determinare amplificazioni del moto sismico ed innescare o riattivare fenomeni di instabilità. Le conoscenze territoriali oggi disponibili in Emilia-Romagna, soprattutto grazie alla cartografia geologica, alle banche dati geognostiche, alle carte topografiche e ai modelli digitali del terreno, permettono la rapida individuazione degli elementi geologici e morfologici che possono favorire gli effetti locali (v. Allegato A1 DGR 476/2021).

Per quanto non indicato negli indirizzi regionali costituiscono riferimento per l'analisi della pericolosità locale e la microzonazione sismica:

- gli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” (Gruppo di Lavoro MS, 2008), pubblicati nel 2008 dal Dipartimento della Protezione Civile, in collaborazione con la Conferenza delle Regioni e PA;
- i successivi aggiornamenti e integrazioni promossi dalla Commissione Tecnica per la microzonazione sismica del DPC, relativi alle procedure di analisi della pericolosità sismica locale in condizioni di particolare criticità (instabilità di versante, faglie attive e capaci, liquefazione);
- gli standard di archiviazione e rappresentazione dei dati scaricabili online dal sito del “Centro per la microzonazione sismica e le sue applicazioni” (v. [sitografia](#)).

Tutti i Comuni della Provincia di Ferrara dispongono di studi di microzonazione sismica.

Gli studi di microzonazione sismica, realizzati secondo gli standard regionali e nazionali, sono pubblicati in formato nel sito web riportato in sitografia. Gli stessi studi sono disponibili in formato GIS editabile per gli operatori di protezione civile in un sito dedicato della piattaforma regionale MOKA.

5.3. L'analisi della condizione limite di emergenza

Dal 2012, agli studi di microzonazione sismica vengono associate le analisi della condizione limite di emergenza (CLE), ovvero le analisi della vulnerabilità e della pericolosità dei siti delle strutture ritenute necessarie per la gestione dell'emergenza (edifici di coordinamento dei soccorsi, presidi sanitari, aree di emergenza, viabilità di accesso e collegamento) affinché i centri abitati, in caso di sisma, conservino l'operatività della maggior parte delle funzioni strategiche.

La funzionalità delle strutture strategiche è valutata anche in base alle condizioni geologiche e morfologiche dei siti in cui hanno sede le strutture stesse.

In pratica, l'analisi della CLE offre una fotografia dello stato dell'arte della funzionalità delle strutture strategiche e costituisce quindi anche uno strumento di verifica e aggiornamento dei piani di protezione civile.

Il semplice confronto tra le carte di analisi della CLE e quelle di microzonazione sismica consente di individuare facilmente le zone in cui sono presenti elementi di pericolosità locale che potrebbero compromettere la funzionalità del sistema durante l'emergenza.

In sintesi, l'analisi della CLE, associata alla microzonazione sismica, fornisce elementi essenziali per valutare l'opportunità di conservare, nei siti scelti, le funzioni strategiche, programmare eventuali interventi di miglioramento e/o messa in sicurezza degli edifici strategici e degli edifici interferenti con la viabilità di accesso e connessione, o in alternativa delocalizzare in siti più idonei le funzioni strategiche; questa analisi permette anche di individuare facilmente le zone potenzialmente instabili che interferiscono con la viabilità e quindi programmare eventuali interventi di manutenzione in tempo di "pace" o interventi prioritari di controllo in caso di emergenza sismica.

Anche le analisi della condizione limite di emergenza sono pubblicate in formato pdf nel medesimo sito web e disponibili in formato GIS editabile per gli operatori di protezione civile in un sito dedicato della piattaforma regionale MOKA.

Le linee guida e gli standard di archiviazione e rappresentazione dei dati delle analisi CLE sono disponibili sul sito del "Centro per la microzonazione sismica e le sue applicazioni".

6. RAPPRESENTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA A SCALA DI AREA VASTA

6.1. Criteri cartografici adottati

Di seguito vengono sinteticamente descritti i criteri e le varie fasi di realizzazione della cartografia di pericolosità sismica a supporto del PTAV.

La revisione cartografica e l'aggiornamento rispetto alle cartografie riportate nel PTCP della Provincia di Ferrara è consistita fondamentalmente nel:

- raccolta dei dati sismotettonici e sismologici nell'ultimo decennio (Martelli et al., 2017a; Locati et al., 2022; Rovida et al., 2022);
- aggiornamento degli elaborati seguendo il quadro di riferimento normativo aggiornato (DGR 476/2021 e DGR 630/2021);
- raccolta ed elaborazione dei dati di microzonazione sismica di I livello forniti dalla Regione Emilia-Romagna, con particolare riferimento alle aree stabili ed instabili;
- elaborazione dei dati altimetrici del DTM della Regione Emilia-Romagna a risoluzione 5x5 m, al fine di individuare i dossi e le aree arginali potenzialmente suscettibili di *Lateral Spreading* in caso di forte evento sismico;
- redazione di una carta geologico-tecnica che considera le caratteristiche geotecniche dei primi 20 m di sottosuolo (granulometria prevalente o più significativa ai fini della risposta sismica locale);
- redazione di una carta di Area Vasta delle aree suscettibili di effetti locali, ovvero liquefazione, riconsolidazione con conseguenti cedimenti post-sismici e *Lateral Spreading* delle aree rilevate.

6.2. Carta geologico-tecnica nei primi 20 m di sottosuolo

La carta riportata in [Fig. 6.1](#) rappresenta una classificazione dei terreni a scala provinciale basata sulle proprietà geotecniche dei principali terreni presenti nei primi 20 m di sottosuolo. È stata creata a partire dalla carta “Geologia di superficie” del PTCP vigente della Provincia di Ferrara, ed implementata con i dati conoscitivi derivati principalmente dagli studi di microzonazione sismica dei singoli comuni. Le numerose indagini geologiche eseguite a supporto di questi studi hanno permesso

l'aggiornamento della mappa preesistente, soprattutto per quanto riguarda le porzioni del territorio urbanizzato. Oltre che informazioni di tipo geotecnico, essa riporta anche informazioni di carattere geomorfologico (come la presenza di paleoalvei dei corsi d'acqua, ventagli di rotti e cordoni dunosi) e l'indicazione dell'ambiente genetico-deposizionale.

Così come la “Carta della litologia di superficie” in [Fig. 2.5](#), anche a corredo di questa carta vengono riportate, rispettivamente in basso a sinistra e a destra, le mappe della profondità, in m.s.l.m., della base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), tratta dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli et al., 2017a), e del Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), tratta da Martelli (2021), indicative dello spessore dei sedimenti continentali recenti (Pleistocene medio-Olocene) e della profondità del substrato geologico (depositi francamente marini del Pliocene-Pleistocene inferiore), generalmente più consolidato. Tali informazioni sono assai utili per la stima della profondità del tetto del substrato rigido che può essere assunto come “bedrock sismico” per le analisi di risposta sismica locale (v. paragrafo successivo).

Si precisa che questa carta è stata redatta al fine di aggiornare il quadro conoscitivo del PTAV dal punto di vista geologico – geotecnico, fornendo una visione a scala di Area Vasta del territorio ferrarese, che può essere di supporto ad altre amministrazioni o privati nell'ambito di programmazione di studi più approfonditi e sito-specifici.

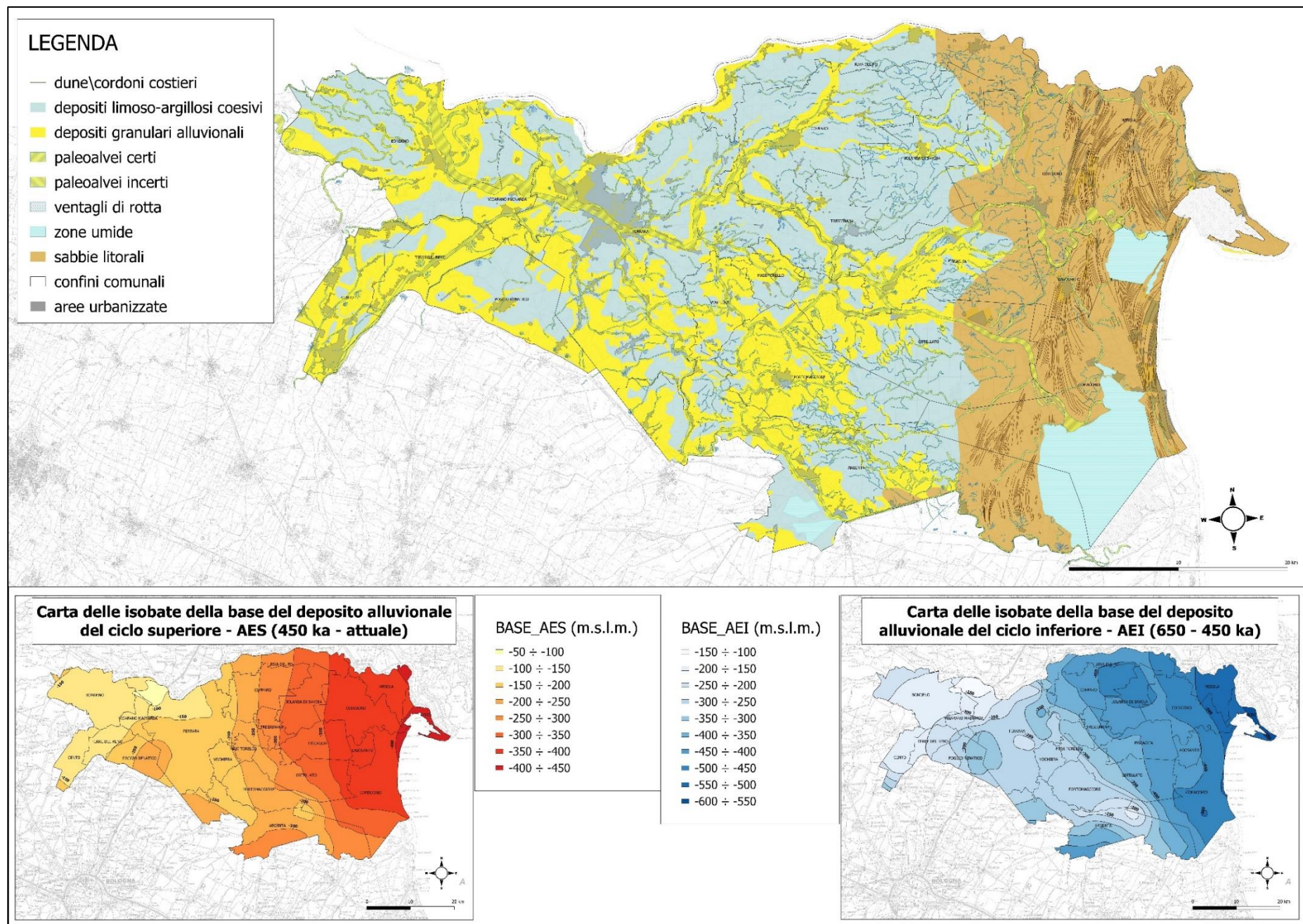


Figura 6.1: carta geologico-tecnica della Provincia di Ferrara. Si considerano le caratteristiche geotecniche dei terreni nei primi 20 m si sottosuolo. Vengono inoltre riportate le carte della base dell'AEI (a destra) e dell'AES (a sinistra) in m.s.l.m. **Elaborazione a cura del Servizio Pianificazione territoriale e urbanistica della Provincia di Ferrara.**

6.3. Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali

Normative regionali (LR 19/2008, LR 24/2017) e nazionali (NTC, 2018) chiamano gli Enti Locali a concorrere alla mitigazione del rischio sismico effettuando analisi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione del territorio cui subordinare le previsioni contenute negli strumenti urbanistici e gli interventi. Tali previsioni e interventi devono risultare compatibili con le condizioni di pericolosità locale del territorio evidenziate dalle analisi effettuate.

Come già detto, l'analisi delle condizioni locali di pericolosità geologica ai fini della prevenzione e mitigazione del rischio sismico risulta più efficace se applicata fino dalle prime fasi di programmazione territoriale e pianificazione urbanistica, quindi già negli strumenti di pianificazione di Area Vasta, come richiesto anche dagli indirizzi regionali per la microzonazione sismica (v. Allegato A alla DGR 564/2021)

L'analisi della pericolosità sismica locale alla scala di area vasta, per l'identificazione delle parti di territorio suscettibili di effetti locali ([Fig. 6.2](#)), è stata basata sullo studio, l'interpretazione e l'elaborazione delle informazioni di tipo geologico, geomorfologico e litologico contenute nelle carte tematiche disponibili, sintetizzate nella "Carta geologica-tecnica" ([Fig. 6.1](#)).

Il territorio della provincia presenta infatti alcune peculiarità che lo rendono soggetto ad effetti locali in caso di sisma, come è stato constatato durante gli eventi di maggio 2012. L'area ferrarese, come descritto nel cap. 2, è un bacino sedimentario caratterizzato dalla presenza di strati di terreno molto deformabili (depositi fluvio-deltizi e costieri) sovrastanti un substrato più rigido (Dorsale Ferrarese): in queste condizioni il moto sismico risultante in superficie può differire notevolmente dal moto di ingresso al substrato roccioso a causa delle modalità di propagazione delle onde sismiche nei terreni sciolti, con possibilità di aumento dell'ampiezza e della durata del moto sismico. Tutto il territorio provinciale è dunque potenzialmente suscettibile di effetti stratigrafici di amplificazione del moto sismico. Inoltre, in corrispondenza dei paleoalvei principali, dei paleoalvei secondari, dei ventagli e depositi di rotta e tracimazione, dei depositi di cordone litorale e di dune eoliche, sono presenti, a profondità variabili ma comunque nei primi 20 m, corpi di materiale prevalentemente granulare, sottofaldati, di vario spessore. Questi corpi sabbiosi risultano potenzialmente liquefacibili in caso di sisma, anche se l'occorrenza di tali fenomeni è fortemente condizionata dall'entità dello scuotimento sismico (la liquefazione è attesa per terremoti di magnitudo almeno pari a 5). Infine, in caso di forte terremoto, anche i terreni soffici ($R_p < 5 \text{ kg/cm}^2$; $C_u < 0,25 \text{ kg/cm}^2$), entro i quali i depositi sabbiosi sono spesso inglobati, possono essere potenzialmente soggetti a cedimenti per riconsolidazione.

Queste considerazioni circa il comportamento dei terreni ferraresi sotto l'effetto di sollecitazioni dinamiche hanno condotto alla redazione della “Carta delle aree suscettibili di effetti locali” (Fig. 6.2), aggiornata anche con i dati sul territorio urbanizzato provenienti dalle microzonazioni sismiche dei singoli comuni:

- 1) nelle aree di paleoalveo e per tutte le aree caratterizzate dalla presenza di corpi sabbiosi sottofalda, indicate in colore arancione in [Fig. 6.2](#), gli effetti di sito attesi sono l'amplificazione stratigrafica, la liquefazione e i conseguenti cedimenti;
- 2) per le aree formatesi in ambiente costiero, caratterizzate dalla presenza di depositi di cordone litorale e di duna e depositi di palude, spesso saturi, anch'esse rappresentate in carta in colore arancione ([Fig. 6.2](#)), gli effetti di sito attesi sono ancora l'amplificazione stratigrafica, la liquefazione, con relativi cedimenti ed i cedimenti per riconsolidazione dei terreni fini soffici ($R_p < 5 \text{ kg/cm}^2$; $C_u < 0,25 \text{ kg/cm}^2$);
- 3) per le aree appartenenti all'ambiente dei bacini interfluviali, e in quelle a predominanza di sedimenti fini coesivi, rappresentate in carta in colore giallo ([Fig. 6.2](#)), gli effetti di sito attesi sono l'amplificazione stratigrafica e potenziali cedimenti per riconsolidazione di terreni soffici;
- 4) per le aree rilevate, dossi e rilievi arginali dei principali corsi d'acqua/canali, in presenza di terreni granulari saturi, rappresentate con il colore rosso ([Fig. 6.2](#)), gli effetti di sito attesi sono, oltre l'amplificazione e la liquefazione, potenziali fenomeni di espansione laterale (*Lateral Spreading*) correlati all'eventuale liquefazione di terreni granulari saturi.

Per mappare le aree suscettibili di spostamenti laterali (v. punto 4), sulla base dell'esperienza di microzonazione sismica condotta nel Comune di Terre del Reno (MS Terre del Reno, 2023), è stato svolta una specifica elaborazione che ha permesso di estrapolare, utilizzando il DTM 5x5 m della Regione Emilia-Romagna, le porzioni di territorio corrispondenti alle arginature dei corsi d'acqua/canali principali ([Fig. 6.3](#) a-b)

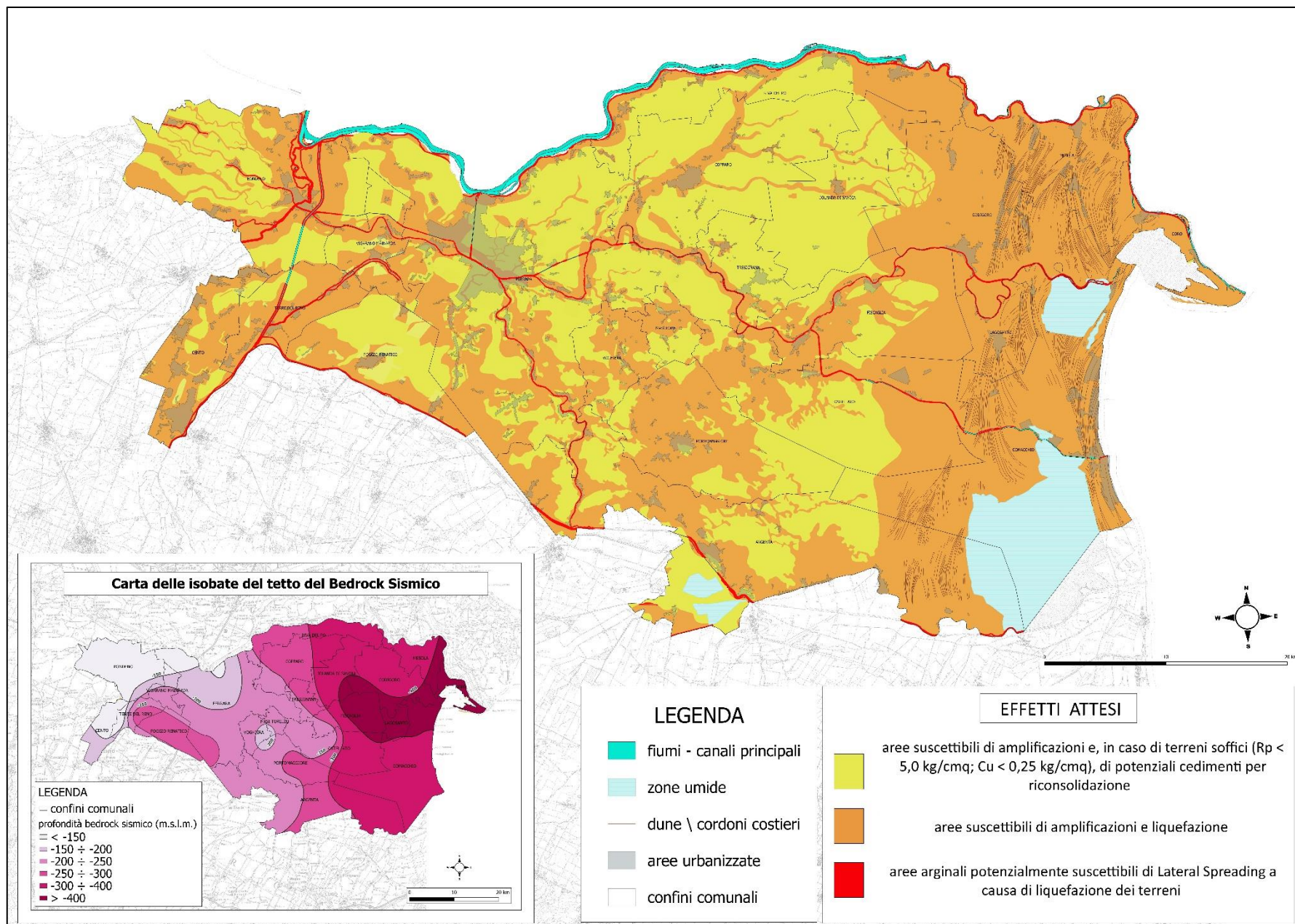


Figura 6.2: carta delle aree suscettibili di effetti locali a scala di Area Vasta. Nel riquadro, mappa della profondità del tetto del bedrock sismico in m.s.l.m. (modificata da Mascandola et al., 2019). Elaborazione a cura del Servizio Pianificazione territoriale e urbanistica della Provincia di Ferrara.

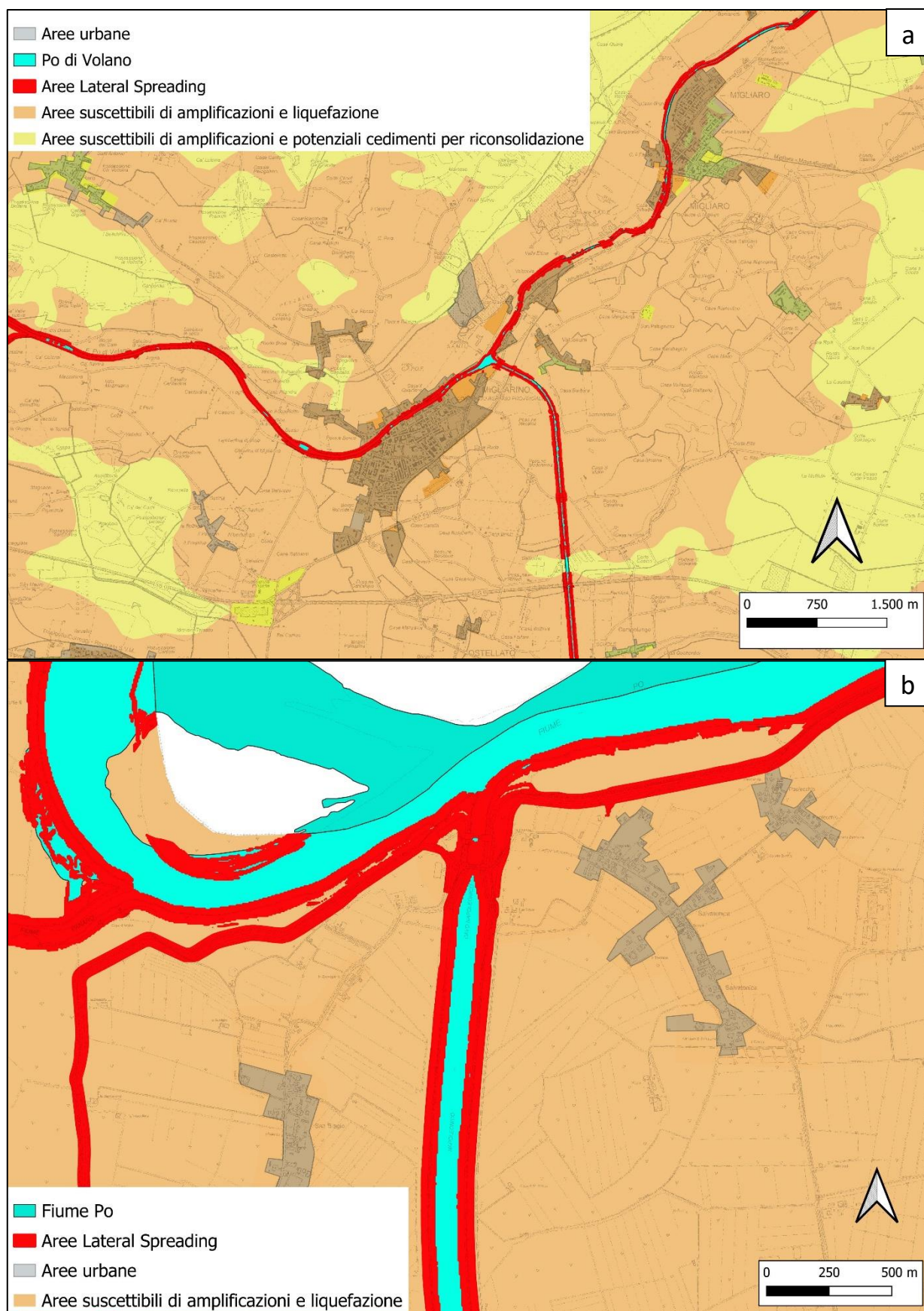


Figura 6.3: a) stralcio della Carta delle aree suscettibili di effetti locali in Comune di Bondeno, in particolare nella zona che interessa la sponda meridionale del Po da dove ha origine il Cavo Napoleonico. In rosso, vengono rappresentate le aree arginali potenzialmente suscettibili di Lateral Spreading; b) stralcio della carta delle aree suscettibili di effetti locali in zona Migliarino, dove il fiume Po di Volano si dirama.

A corredo della mappa delle aree suscettibili di effetti locali è stato riportato anche uno stralcio, riferito al territorio ferrarese, della mappa della profondità del “bedrock sismico” derivata da quella proposta da Mascandola et al., 2019 e modificata in base ai successivi studi di microzonazione sismica.

Il “bedrock sismico” è il substrato dei sedimenti non addensati/poco consolidati, caratterizzato da comportamento decisamente più rigido rispetto alla successione sovrastante.

Per individuare la profondità del substrato rigido sono assai utili le registrazioni e analisi delle misure di rumore ambientale secondo il metodo di Nakamura, 1989. È infatti noto che la frequenza naturale di vibrazione del terreno (F_n) è legata allo spessore dei sedimenti non consolidati (H) e alla velocità media di propagazione delle onde di taglio (V_s) nei suddetti sedimenti non consolidati secondo la relazione

$$F_n = \frac{V_s}{4H}$$

Studi di rumore ambientale a scala di area vasta d’interesse per il territorio ferrarese sono quello di Paolucci et al., 2015 e, soprattutto, quello di Mascandola et al., 2019. Entrambi questi studi individuano frequenze naturali del terreno ([Fig. 6.4](#)) variabili tra 0,6 e 0,8 Hz nel settore occidentale della provincia, dove il substrato geologico è a profondità comprese tra 120 e 200 m. Mascandola et al., 2018 individuano poi una rapida diminuzione dei valori di frequenza naturale verso est, fino a meno di 0,3 Hz nella zona nord-orientale (Delta del Po), dove lo spessore dei sedimenti continentali supera i 400 m.

Tali valori sono stati ampiamente confermati dai successivi studi di microzonazione sismica.

Secondo la normativa tecnica (Eurocodice 8; NTC, 2018) il “bedrock sismico” è caratterizzato da velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) almeno pari a 800 m/s. I vari studi di microzonazione sismica condotti nella pianura emiliana hanno permesso di verificare che solo in corrispondenza degli alti strutturali sepolti (tra Novi di Modena e Rivara, nel modenese, e tra Bondeno e Casaglia, nel ferrarese) il substrato a comportamento più rigido, costituito da formazioni pre-quaternarie, a profondità minori di 150 m, è caratterizzato da $V_s \geq 800$ m/s; negli altri casi, il tetto del substrato a comportamento più rigido è stato individuato nella successione pleistocenica, a profondità di almeno di 150 m, ed è risultato che nella parte superiore di tale “bedrock sismico” V_s è dell’ordine di 650÷700 m/s.

I valori di frequenza naturale del terreno sono di estrema importanza anche per la progettazione e realizzazione di opere, al fine di prevenire fenomeni di doppia risonanza nell'interazione terreno-struttura.

Si precisa che questa carta è stata redatta al fine di aggiornare il quadro conoscitivo del PTAV dal punto di vista dei possibili effetti locali indotti da un sisma, fornendo una visione a scala di Area Vasta del territorio ferrarese, che può essere di supporto ad altre amministrazioni o privati nell'ambito di programmazione di studi più approfonditi e sito-specifici.

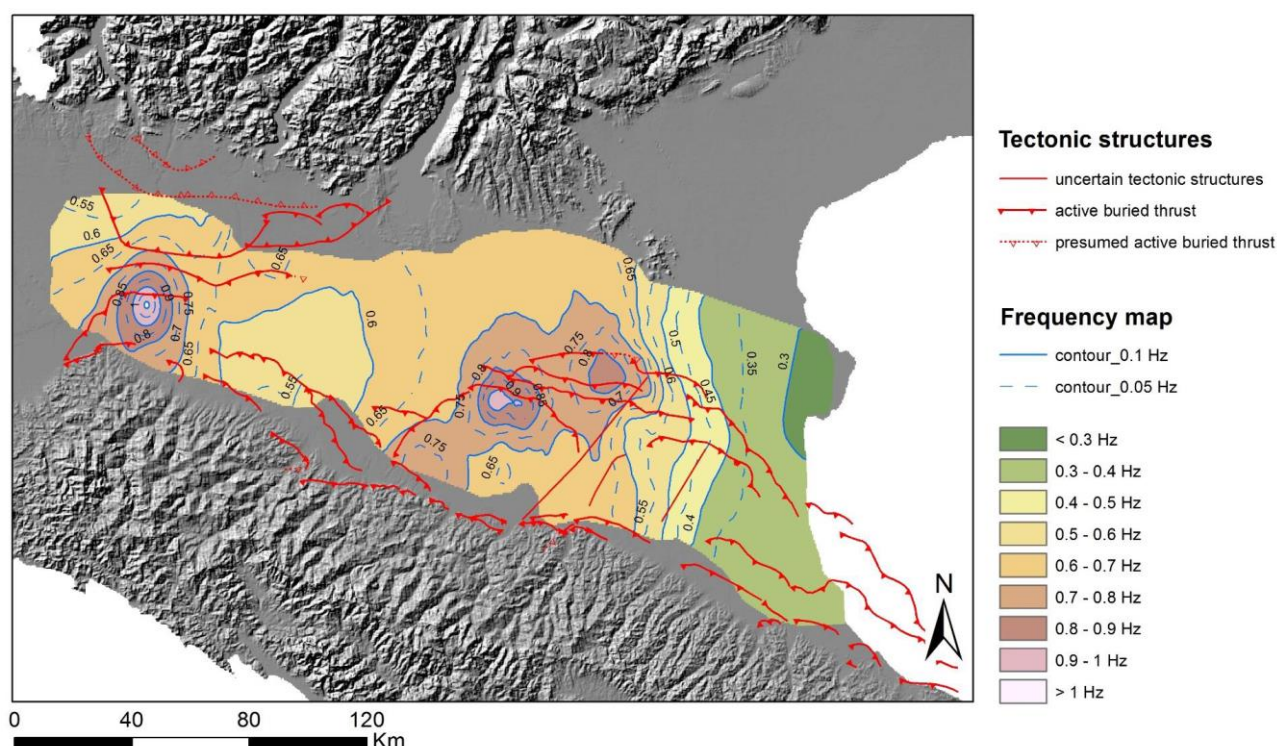


Figura 6.4: mappa delle frequenze naturali dei terreni (f_0) al di sopra del bedrock sismico in Pianura Padana (tratta da Mascandola et al., 2019).

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi della pericolosità sismica effettuata a supporto del nuovo Piano Territoriale di Area Vasta ha sostanzialmente confermato la validità dello studio svolto negli anni 2013-2014 per la variante al Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale.

L'integrazione con gli studi condotti a scala comunale ha permesso di evidenziare quanto segue:

- dato l'elevato spessore di terreni alluvionali poco consolidati/addensati, il tetto del "bedrock sismico" è a profondità ovunque maggiori di 120÷130 m, come indicato anche dai valori di frequenza naturale del terreno generalmente minori di 0,8 Hz, anche in corrispondenza degli alti

strutturali sepolti dell'alto ferrarese; verso la costa lo spessore dei sedimenti non consolidati aumenta fino a superare i 400 m e i valori di frequenza naturale del terreno scendono fino a meno di 0,3 Hz indicando, soprattutto nel settore nord-orientale, una profondità del bedrock sismico maggiore di 400 m (v. Mascandola et al., 2018, e studi MS comunali disponibili al [link](#) in bibliografia).

- data la natura dei sedimenti del sottosuolo, tutto il territorio è suscettibile di amplificazione, con alcune distinzioni sostanziali: le aree con spessore di sedimenti poco consolidati/addensati maggiore di 200-250 m sono caratterizzate da amplificazioni molto contenute, talora nulle, per i bassi periodi ($T < 0,4$ s); per periodi $T > 0,4$ s l'amplificazione è invece sempre rilevante (v. studi MS comunali);
- in termini di pericolosità sismica assoluta, e rispetto alla scala nazionale, data la non elevata pericolosità sismica di base, il territorio provinciale ha una pericolosità che varia da media, nei settori occidentale e meridionale, a bassa verso il delta del Po e la costa (v. carte H_{SM} delle MS comunali consultabili al [link](#) di cui sopra);
- i terreni predisponenti la liquefazione (sedimenti granulari sciolti e saturi nei primi 15 m), sia di ambiente alluvionale che costiero, sono ovunque piuttosto diffusi ([Fig. 6.2](#), “Carta delle aree suscettibili di effetti locali”); fortunatamente, lungo la costa e nella zona del delta del Po, data la bassa pericolosità sismica di base ([Fig. 5.1](#)) e l'amplificazione non elevata o nulla della PGA, il rischio di liquefazione risulta generalmente basso, tutt'al più moderato (valore dell'indice potenziale di liquefazione $IL < 5$); il rischio di liquefazione è invece non trascurabile, talora rilevante, nei settori occidentale e meridionale del territorio provinciale, dove sono maggiori sia la pericolosità sismica di base sia l'amplificazione, come testimoniato dai diffusi fenomeni e danni correlati osservati in occasione del terremoto del 20 maggio 2012 e dalle cronache storiche del terremoto di Argenta del 1624 (v. studi MS comunali).

8. BILANCIO ALL'INTERNO DEL SISTEMA DELLA SICUREZZA TERRITORIALE

Nella tabella seguente viene riassunto il contributo che l'approfondimento sulla pericolosità sismica fornisce al territorio di Area Vasta.

Contributo conoscitivo fornito:
<ul style="list-style-type: none"> • adeguata conoscenza delle condizioni di pericolosità sismica al fine di prevedere e contenere, attraverso adeguate azioni pianificatorie, il rischio sismico.
Punti di forza/opportunità:
<ul style="list-style-type: none"> • Tutti i comuni dispongono di uno studio di microzonazione sismica almeno di II livello; • Disponibilità di informazioni approfondite da analisi sismiche a scala comunale e da progettazione edilizia;

Punti di debolezza/vulnerabilità: <ul style="list-style-type: none"> • Diffusi elementi morfologici o litologici e di instabilità suscettibili di effetti sismici locali; • Patrimonio edilizio esistente per lo più datato e non realizzato secondo criteri antisismici, con maggiori criticità nelle aree dei centri storici; • Onerosità degli interventi edilizi di adeguamento/miglioramento antisismico.
Allegati di approfondimento: Allegato 1 - Carta della litologia di superficie (scala 1:100.000); Allegato 2 - Carta geologico-tecnica (scala 1:100.000); Allegato 3 – Carta delle aree suscettibili di effetti locali (scala 1:100.000).

9. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Boccaletti, M., Bonini, M., Corti, G., Gasperini, P., Martelli, L., Piccardi, L., Tanini, C., Vannucci, G. (2004): Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Area Geologia, Suoli e Sismica, Regione Emilia-Romagna, and CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse, Sezione di Firenze. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/pubblicazioni/cartografia-geo-tematica/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-in-scala-1-250-000-2004-1>

Boccaletti M., Corti G., Martelli L. (2011): Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy). Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rundsch.), 100, 1331–1348, doi:10.1007/s00531-010-0545-y.

Castiglioni G.B. (2001): Le risposte del sistema fluviale alle variazioni ambientali. In: Castiglioni G.B. & Pellegrini G.B. (a cura di) Note illustrative della Carta Geomorfologica della Pianura Padana, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 4, pp. 165-188.

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

Gruppo di lavoro MPS (2004): Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano.Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici. <https://es1-gis.mi.ingv.it/>

Gruppo di Lavoro MS (2008): Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Conferenza delle Regioni e Province autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137

ISIDe Working Group INGV (2015): Italian Seismological Instrumental and parametric Database. <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>

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>

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. (2022): Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>

Martelli et al. (2013): Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di Maggio-Giugno 2012. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>

Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017a): Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>

Martelli L., Santulin M., Sani F., Tamaro A., Bonini M., Rebez A., Corti G., Slejko D. (2017b): Seismic hazard of the Northern Apennines based on 3D seismic sources. *Journal of Seismology*, 21, 1251–1275. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1.

Martelli L. (2021): Assessment of Seismic Bedrock in Deep Alluvial Plains. Case Studies from the Emilia-Romagna Plain. *Geosciences* 2021, 11, 297. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070297>

Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V. (2019): Mapping the Seismic Bedrock in the Po-Plain (Italy) through ambient vibration monitoring. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 109(1), 164-177. doi: 10.1785/0120180193

Meletti C., Valensise G. (eds) (2004): Zonazione sismogenetica ZS9. In: Gruppo di Lavoro, Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003, Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma, App 2, 38 pp.

Molinari F.C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Caputo D.R., Martinelli G. (2007): Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. Area Geologia, suoli e sismica, Regione Emilia-Romagna Provincia di Ferrara, Servizio Politiche della Sostenibilità e Cooperazione Internazionale Università degli Studi di Ferrara - Dipartimento di Scienze della Terra.

MS Terre del Reno (2023): Microzonazione sismica del Comune di Terre del Reno. Accordo di collaborazione tra Regione Emilia-Romagna, Comune di Terre del Reno, CNR–IGAG e Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale – Dip. Ingegneria Civile e Meccanica. Studio realizzato con contributi art. 11 L 77/2009, OCDPC 675/2020. <https://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/index.jsp?id=38028>

Paolucci E., Albarello D., D’Amico S., Lunedei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy. Bull. Earthquake Eng., 13 (11): 3187-3206, DOI: 10.1007/s10518-015-9767-5.

Pieri M., Groppi G. (1981): Subsurface geological structure of the Po Plain. Pubbl.414, PF Geodinamica. C.N.R. pp. 23.

NTC (2018): Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”. Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17/01/2018. G. U. Repubblica Italiana, 20/2/2018, n. 42, Suppl. Ordin. n. 8.

RER (1999): Carta geologica di pianura dell’Emilia-Romagna alla scala 1:250.000. A cura di D. Preti. Regione Emilia-Romagna, Servizio Sistemi Informativi Geografici, ufficio geologico. S.EL.CA., Firenze.

RER – ENI, Agip (1998): Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ENI Agip Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp. 120. Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (2022): Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/cpti/cpti15.4>.

Sitografia:

Banca dati IPSI-INGV: <https://ingvterremoti.com/2021/08/10/il-campo-di-sforzo-in-italia-la-banca-dati-ipsi/>

Centro per la microzonazione sismica e le sue applicazioni:

<https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/strumenti/>

Cartografia interattiva DISS-ITHACA: <https://diss.ingv.it/ithdiss/#>

Catalogo CPTI15 (Rovida et al., 2022; 2020): <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

Catalogo RCMT – INGV: <https://rcmt2.bo.ingv.it/>

Catalogo TDMT – INGV: <https://terremoti.ingv.it/tdmt?timezone=UTC>

Lista terremoti in tempo reale INGV: <https://terremoti.ingv.it/>

Mappa interattiva pericolosità sismica di base (Meletti et al., 2004): <http://esse1.mi.ingv.it/>

Programma nazionale di soccorso per il rischio sismico dell'Emilia-Romagna:

<http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/>

Sezione Geologica di sottosuolo dall'allegato "Geologia di sottosuolo" al foglio 206 Poggio Renatico del Progetto CARG- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000:

<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/pozzi-per-idrocarburi-e-sezioni-geologiche#autotoc-item-autotoc-0> .