



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

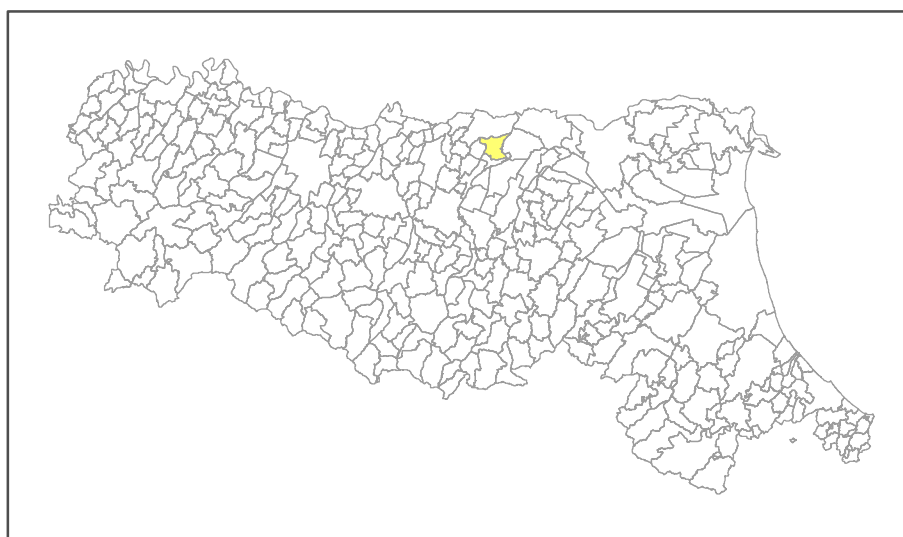
Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna
Comune di San Felice sul Panaro



Regione Emilia–Romagna	Soggetto realizzatore Dott. Geol. Valeriano Franchi	Data Marzo 2022
---------------------------	--	--------------------

Responsabile

Ing. Anna Aragone

Soggetto realizzatore

Dott. Geol. Valeriano Franchi

Gruppo di lavoro

Dott. Geol. Alessandro Ghinoi

Dott. Geol. Stefano Capocchi

Dott. Geol. Marco Sacchi

Dott.ssa Lara Vandelli

INDICE DEI CONTENUTI

1. Introduzione.....	4
2. Inquadramento territoriale e cartografico	7
3. Definizione della pericolosità sismica di base e degli eventi sismici di riferimento ...	9
3.1. Sismicità del territorio comunale.....	12
4. Aspetti geologici e geomorfologici	17
4.1. Lineamenti geologici generali	17
4.2. Assetto geomorfologico	20
4.2.1. Evoluzione idrografica	21
4.2.2. Contesti geomorfologici	23
5. Modello del sottosuolo.....	27
6. Dati geotecnici e geofisici.....	33
7. Interpretazioni e incertezze.....	38
8. Metodologie di elaborazione e risultati	39
8.1. Analisi di risposta sismica locale	39
8.2. Analisi della suscettività alla liquefazione	49
8.2.1. Calcolo dei cedimenti post-sismici	56
9. Elaborati cartografici	58
9.1. Carta geologico-tecnica	58
9.2. Carta delle indagini	59
9.3. Carta delle Vs.....	60
9.4. Carta delle frequenze.....	61
9.5. Carta delle MOPS	63
9.6. Carta di microzonazione sismica (MS_0203).....	67
9.7. Carta dei cedimenti post-sismici	70
10. Confronto con la distribuzione dei danni degli eventi passati	71
11. Bibliografia	74

1. INTRODUZIONE

Su incarico del Comune di San Felice sul Panaro (MO) è stato realizzato uno studio di **Microzonazione Sismica di III livello** all'interno del territorio comunale, nel rispetto del seguente quadro normativo:

- O.C.D.P.C. n. 171 del 19 giugno 2014: "Contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico per l'anno 2013";
- Decreto del Capo Dipartimento della Protezione Civile del 4 agosto 2014: "Ripartizione delle risorse previste dall'articolo 11 del decreto legge n. 39 del 28 aprile 2009 per l'annualità 2013";
- D.G.R. n° 1227/2015: "Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica";
- D.G.R. 21 dicembre 2015, n° 2193: "Art. 16 della l.r. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112";
- D.G.R. 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)".
- D.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, L.R. n. 24/2017)".
- D.G.R. integrativa 564/2021.

Inoltre, per gli aspetti tecnici, si è fatto riferimento al documento "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (ICMS) approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni¹.

L'assetto geologico, geomorfologico e sismico di base viene descritto per l'intero territorio comunale, grazie anche all'esperienza acquisita sul territorio dallo scrivente in occasione della redazione del Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale, parte integrante del quale è l'analisi di microzonazione sismica di II livello effettuata secondo la DAL RER 112/2007. In tale studio erano stati digitalizzati i dati numerici di numerose prove penetrometriche pregresse reperite negli archivi comunali, a cui erano stati aggiunti altri dati da nuove indagini eseguite ad-hoc per la microzonazione. I dati numerici sono stati utilizzati, oltre che per una valutazione della capacità portante dei terreni, anche per una stima del potenziale di liquefazione.

A seguito degli eventi sismici che hanno interessato le province di Modena, Reggio Emilia, Ferrara e Mantova nei mesi di maggio-giugno 2012, la Regione Emilia-Romagna ha effettuato un nuovo studio di microzonazione sismica a seguito dell'Ordinanza n. 70 del 13/11/2012 del Presidente Errani in qualità di Commissario delegato per la ricostruzione post-sisma.

La Regione Emilia-Romagna ha infatti ritenuto necessario procedere alla realizzazione degli studi di microzonazione sismica nei centri abitati e nelle aree di potenziale ricostruzione ed espansione dei Comuni in cui sono stati osservati effetti di intensità macrosismica 6, tra cui anche San Felice sul Panaro. I principali elaborati di questi studi sono:

- carte delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica),
- carte di MS (Microzonazione Sismica),
- carte della CLE (Condizione Limite per l'Emergenza) e

¹ Gruppo di lavoro MS, 2008. "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Link breve: <https://goo.gl/Od0XBo>

- carte di confronto tra MS e CLE.

Per l'intero territorio di San Felice lo studio regionale individua un substrato a profondità inferiore a 120 m mentre suddivide le aree dei centri abitati, di potenziale ricostruzione e di potenziale espansione, in base alla presenza di terreni suscettibili di liquefazione:

- Presenza di terreni suscettibili di liquefazione già nei primi 10 m dal piano campagna;
- Presenza di terreni suscettibili di liquefazione tra 10 e 20 m dal piano campagna.

Per far questo ha utilizzato le numerose prove geotecniche pregresse disponibili presso gli uffici pubblici comunali e regionali. Oltre alla stima della presenza di terreni potenzialmente liquefacibili, lo studio rappresenta cartograficamente anche i punti di effettiva manifestazione superficiale del fenomeno della liquefazione in occasione degli eventi sismici del maggio-giugno 2012.

Considerando la profondità stimata del substrato, sulla base degli abachi della DAL RER 112/2007, lo studio ha anche assegnato fattori d'amplificazione sismica alle varie aree indagate. Infine, è stata eseguita una stima dell'indice di potenziale liquefazione in corrispondenza delle varie verticali penetrometriche considerate, distinguendo tra prove che hanno raggiunto i 20 m di profondità (soglia massima stimata per l'innescare di fenomeni di liquefazione) e prove che si sono spinte non oltre i 10 m (la maggior parte). La classificazione attraverso gli indici di potenziale liquefazione stimati è stata condotta in base al criterio di Sonmez (2003).

Nel 2014, l'Amministrazione Comunale di San Felice, nella Variante al PSC in adeguamento al 1° stralcio del Piano della Ricostruzione, ha sostanzialmente ripreso in toto lo studio di microzonazione sismica della Regione Emilia-Romagna, estendendone i risultati (relativamente ai soli fattori di amplificazione) all'intero territorio comunale, sulla base della carta della profondità del bedrock sismico proposta dall'Ente regionale stesso e sempre considerando gli abachi della DAL RER 112/2007.

Successivamente, nuove indagini geognostiche (CPTu e SCPTu) e geofisiche (HVSr, array sismici, Down e Cross-hole) mirate sono state condotte dalla Regione Emilia-Romagna per approfondimenti relativi soprattutto alla caratterizzazione sismostratigrafica locale ed alla stima del potenziale di liquefazione dei terreni. Ad esse si sono aggiunte ulteriori nuove indagini per il progetto di realizzazione della Autostrada Regionale Cispadana che, come da tracciato di progetto, dovrebbe attraversare il territorio di San Felice nella sua fascia settentrionale, con direzione all'incirca ovest-est.

Tutte queste indagini sono state messe a disposizione dello scrivente, in formato numerico utilizzabile, dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Le numerosissime pratiche edilizie presentate da soggetti privati per la ricostruzione post-sisma a partire dal 2012 fino a tutto il 2017 hanno determinato la disponibilità di ulteriori indagini geotecniche e geofisiche che hanno arricchito enormemente la banca dati a disposizione per il presente studio. Indagini che sono consultabili all'interno delle relazioni geologiche in formato PDF depositate per le pratiche edilizie dei progetti di ricostruzione e che sono state messe a disposizione dello scrivente dall'Amministrazione comunale in modo efficiente e rapido. Questo ha permesso di portare a termine una lunga opera di digitalizzazione dei dati numerici delle prove geognostiche permettendone l'implementazione nel database geografico di microzonazione sismica.

Considerando l'ampissima disponibilità di indagini geognostiche e geofisiche pregresse, le indagini eseguite appositamente per questo approfondimento di MS3 sono state mirate a quelle aree interne agli sviluppi, ove le prove pregresse erano maggiormente rarefatte; la

tipologia (CPTu a 20 m di profondità) ed il numero di indagini (4) sono state concordate con l'Ufficio Tecnico comunale.

Gli obiettivi del presente studio sono stati i seguenti:

1. Ricostruzione della stratigrafia locale (nei primi 20 m) attraverso prove penetrometriche e sondaggi a carotaggio/distruzione.
2. Determinazione della velocità delle onde sismiche nei primi 30 m dal piano campagna tramite acquisizioni Down-hole, Cross-hole, SCPTu, MASW ed array sismici.
3. Determinazione della frequenza fondamentale di vibrazione dei terreni tramite elaborazioni del rumore sismico a stazione singola (HVSR).
4. Stima della profondità del bedrock sismico in vari punti omogeneamente distribuiti sul territorio comunale, tramite il confronto tra profilo di velocità delle onde sismiche nei primi 30 m (ricavato da Down-hole/Cross-hole o SCPTu) ed il valore di frequenza fondamentale di vibrazione del terreno ricavato da HVSR.
5. Analisi di risposta sismica 1D eseguite in corrispondenza dei siti individuati al punto 4 (anche ricadenti al di fuori del territorio di San Felice), per ricavare:
 - a. i fattori di amplificazione della PGA e di vari tratti temporali degli spettri di risposta in accelerazione ed in velocità, sensu DGR 630/2019;
 - b. i valori del parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (*sensu* Naso et al., 2019);
 - c. gli spettri di risposta in superficie in termini di pseudo-accelerazione;
 - d. gli accelerogrammi in superficie.
6. Calcolo dei fattori di amplificazione medi all'interno delle microzone omogenee individuate nella MOPS;
7. Calcolo dell'indice di potenziale liquefazione e dei cedimenti post-sismici in corrispondenza di tutte le verticali CPTu/SCPTu.
8. Elaborazione delle cartografie di MS.

Tutte le attività sono state svolte nel rispetto delle specifiche di cui agli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" elaborati dalla Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica (OPCM 3907/2010, art. 5, comma 7), versione 4.1. del novembre 2018.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E CARTOGRAFICO

Il territorio comunale di San Felice s/P si colloca nella fascia settentrionale della Provincia di Modena, al confine con i Comuni di Medolla, ad ovest, di Finale Emilia, ad est, di Mirandola, a nord, e di Camposanto a sud (Figura 1). Il territorio è inoltre compreso tra i fiumi Secchia (ad ovest) e Panaro (a sud) ed è attraversato in direzione generalmente ovest-est, da importanti canali di bonifica: Canale Diversivo di Burana, Fossa Reggiana, Cavo Vallicella (Figura 2).

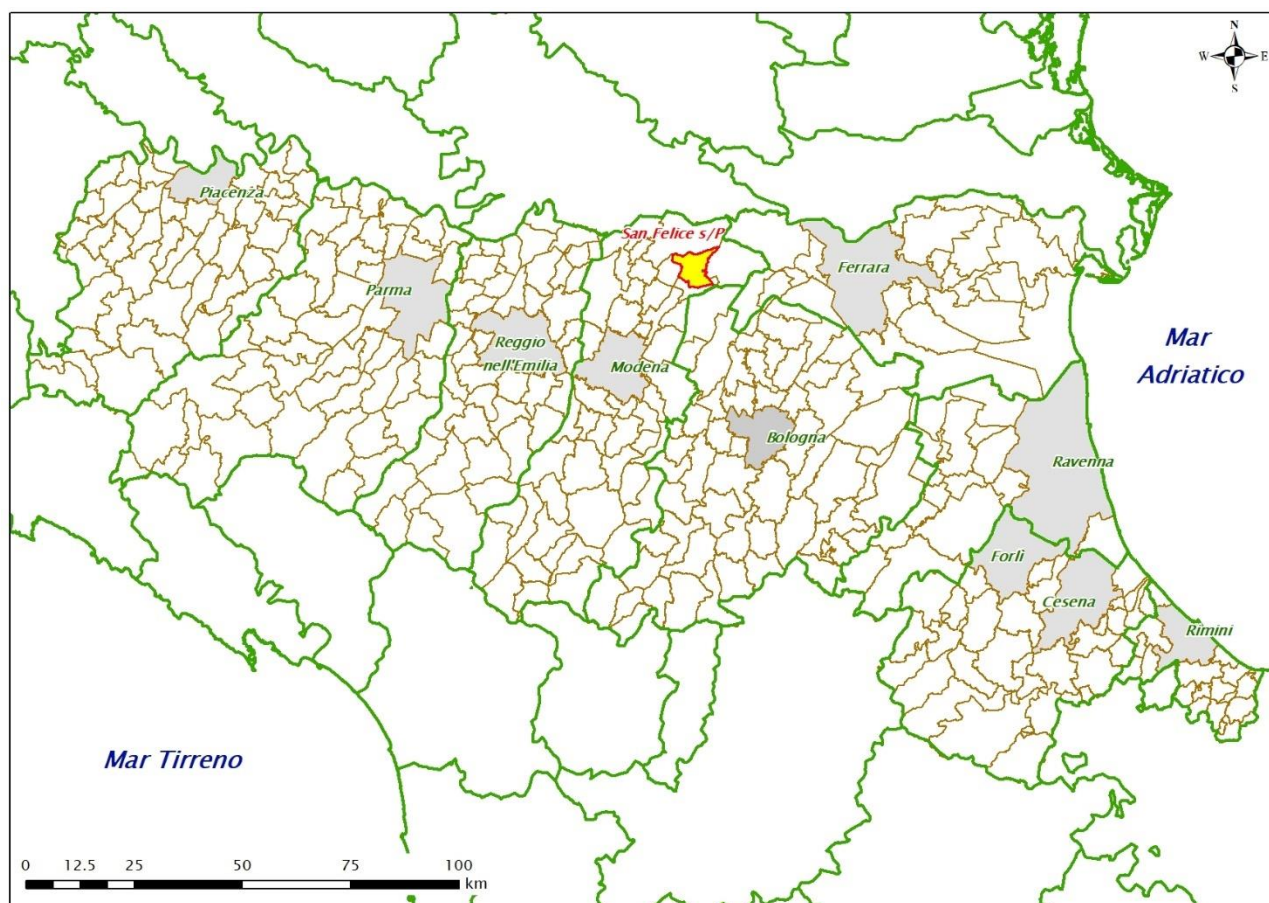


Figura 1 - Inquadramento amministrativo regionale del territorio comunale di San Felice s/P (in giallo in figura).

Il territorio comunale di San Felice s/P fa parte interamente del settore altimetrico di bassa pianura, con quote sul livello del mare (dati da isoipse della cartografia IGM a scala 1:25.000 – si veda Figura 2) che variano da un minimo di circa 10 m in corrispondenza della punta nord-orientale, ai circa 16 m in prossimità della linea di confine con Camposanto.

Il clima è caratterizzato, nel periodo 1991-2015, da precipitazioni totali annue, in media, di 643 mm e temperature medie annue di 13,9°C, pari, rispettivamente, ad una variazione di -16 mm e +1,1°C rispetto al periodo 1961-1990².

² Atlante Idroclimatico dell'Emilia-Romagna (Ed. 2017) -
https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3811&idlivello=1591

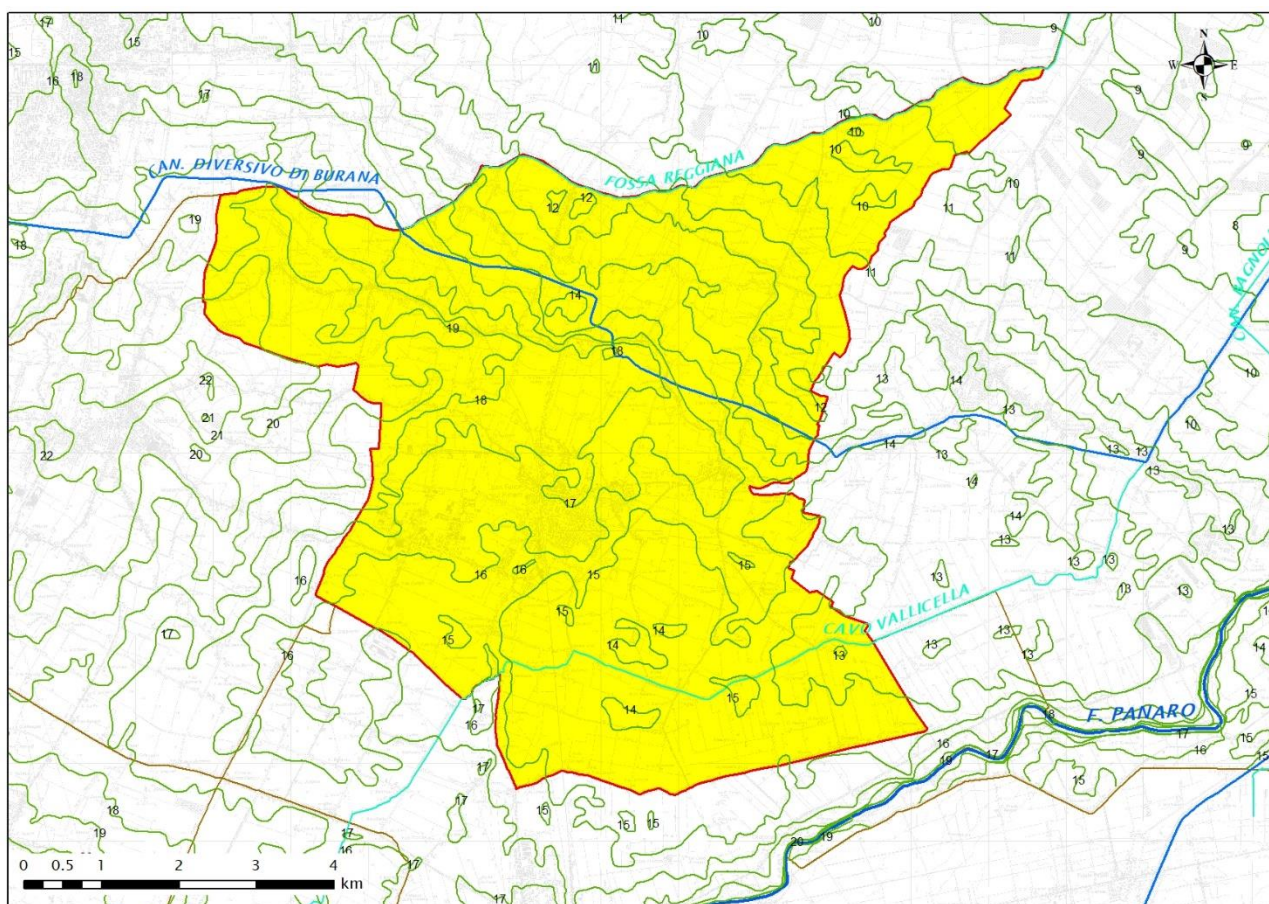


Figura 2 – Inquadramento geografico-fisico del territorio comunale di San Felice s/P.

Nella cartografia regionale, il territorio comunale di San Felice s/P è compreso nelle Tavole alla scala 1:25.000:

- nr. 184SE denominata "Finale Emilia",
- nr. 184SO denominata "Mirandola";

nelle Sezioni alla scala 1:10.000:

- nr. 184100 denominata "Cividale",
- nr. 184110 denominata "Massa Finalese",
- nr. 184140 denominata "San Felice sul Panaro",
- nr. 184150 denominata "Rivara";

e negli Elementi alla scala 1:5.000:

- nr. 184101 denominato "Mortizzuolo",
- nr. 184102 denominato "Ponte di San Pellegrino",
- nr. 184103 denominato "San Biagio",
- nr. 184104 denominato "Cividale",
- nr. 184111 denominato "Cascina della Trota",
- nr. 184113 denominato "Pavignane",
- nr. 184114 denominato "Montirone",
- nr. 184141 denominato "San Felice sul Panaro",
- nr. 184142 denominato "Corzano",
- nr. 184143 denominato "Bosco Saliceta",
- nr. 184144 denominato "Malcantone",
- nr. 184153 denominato "Dogaro",
- nr. 184154 denominato "Rivara".

3. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI SISMICI DI RIFERIMENTO

Il dato di partenza per un'analisi della potenzialità sismica di un territorio è certamente la ricostruzione delle strutture tettoniche maggiormente attive nel tempo geologico più recente, all'incirca l'ultimo milione di anni (neotettonica). Sono queste le strutture che possono, se confermate anche da dati macrosismici e/o sismologici, ragionevolmente costituire sorgente di terremoti anche nel prossimo futuro.

L'analisi neotettonica di un'area si esegue attraverso l'esame di una serie innumerevole di dati di natura geologica, morfoneotettonica, idrogeologica, e idrochimica, che concorrono a definire, appunto, il regime tettonico di quell'area, con l'individuazione di strutture geologiche rilevanti, per giungere eventualmente alla definizione del loro potenziale sismogenetico, il potenziale, cioè, di generare terremoti.

Il territorio comunale di San Felice, dal punto di vista geologico-strutturale, è parte degli Appennini settentrionali, una catena a pieghe e sovrascorrimenti costituita dalla sovrapposizione di unità tettoniche NE-vergenti, la cui formazione è conseguenza della collisione, in epoca cenozoica, tra la Placca Europea e la Placca Adria (Africana). Attualmente, la convergenza tra le due placche ha velocità pari a circa 6-8 mm all'anno, con vergenza all'incirca NO, e si sviluppa lungo un margine di placca ampio e complesso, ove placche e blocchi crostali minori controllano la distribuzione e la cinematica delle deformazioni. Tale convergenza determina una diffusa sismicità ed un quadro deformativo complesso, caratterizzato da un settore (quello tirrenico) con prevalenti campi tensionali distensivi, e da un settore (quello adriatico) ove prevalgono campi tensionali compressivi (Boccaletti et al., 2011).

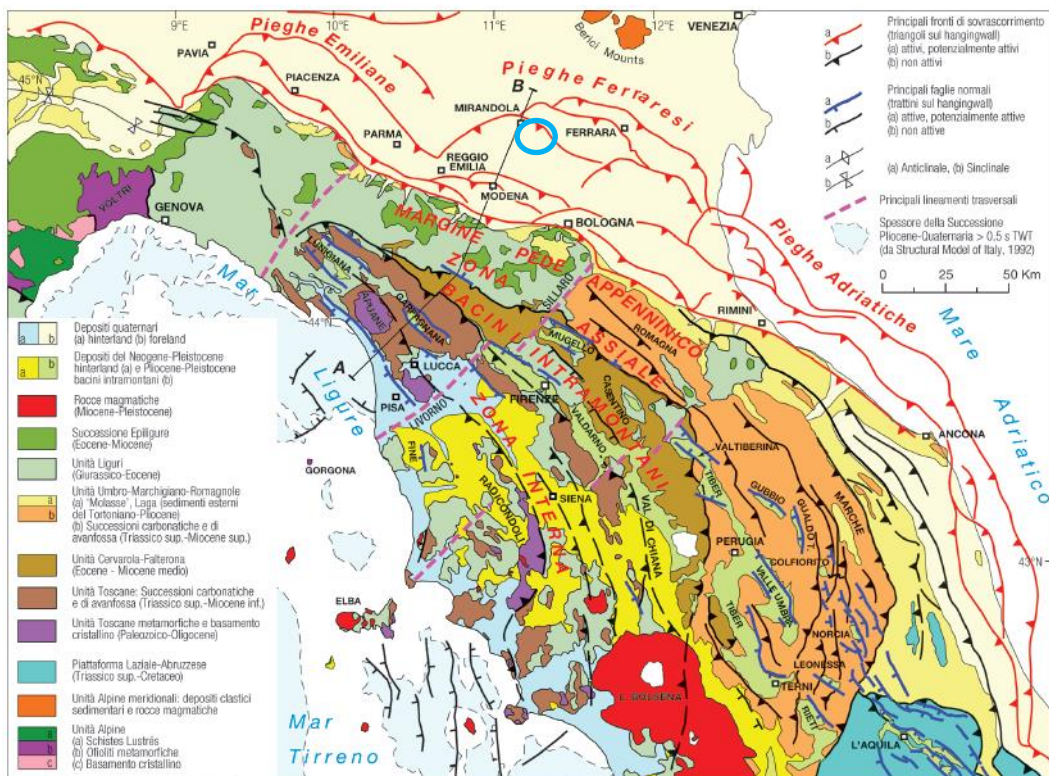


Figura 3 – Schema tettonico dell'Appennino settentrionale e della Pianura Padana (fonte: Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe, a cura di Martelli et al., 2016). Il cerchio azzurro identifica il territorio comunale di San Felice s/p.

In modo più specifico, il territorio comunale di San Felice si colloca nella fascia dei fronti sepolti padani e adriatici (Figura 3), in corrispondenza delle “Pieghe Ferraresi” e, in particolare, della dorsale interna nota come “struttura o alto di Mirandola”.

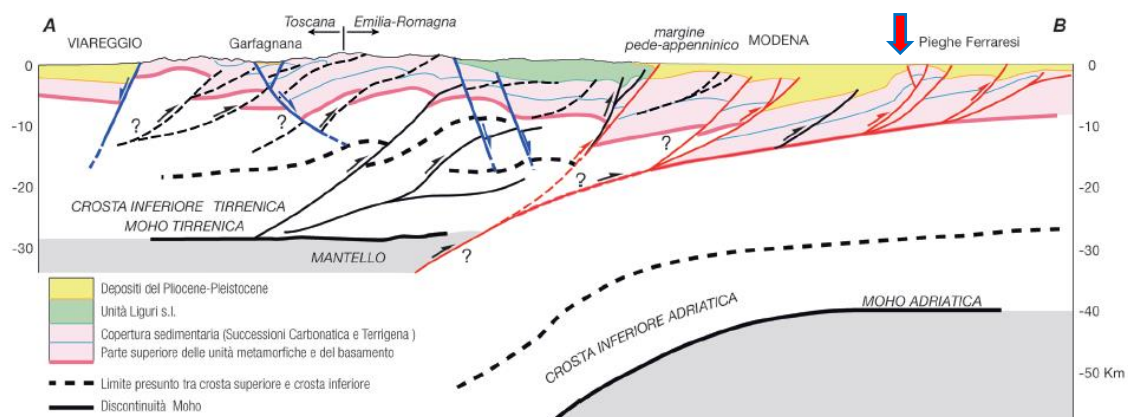


Figura 4 – Sezione geologica dal Mar Ligure al Po, la cui traccia è riportata in Figura 3 (fonte: Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe, a cura di Martelli et al., 2016). La freccia rossa identifica il territorio comunale di San Felice s/P.

La fascia dei fronti sepolti è caratterizzata dalla presenza di sistemi di pieghe e *thrust* sepolti, con immersione verso il quadrante SSO-SO, che hanno determinato la formazione di bacini di *piggyback* attualmente colmati dai depositi continentali di età Pleistocene medio-Olocene. La recente attività dei fronti sepolti è dimostrata dalle evidenti deformazioni dei depositi del Pleistocene medio-superiore (la base del Sintema Emiliano-romagnolo Superiore risulta evidentemente piegata) (Boccaletti et al., 2004; 2011), ed anche dalla disposizione arcuata dell'attività sismica registrata, corrispondente in modo perfetto con le dorsali sepolte, localizzate attraverso prospezioni geognostiche e geofisiche eseguite nel tempo, principalmente per la ricerca di idrocarburi.

La sismicità è generalmente superficiale (profondità ipocentrale ≤ 10 Km), con epicentri che si concentrano in particolare in corrispondenza proprio delle Pieghe Ferraresi, recentemente interessate da sequenze sismiche importanti, quali quella di Reggio Emilia dell'ottobre 1996 e quella di Finale Emilia-Mirandola del maggio-giugno 2012 (Martelli et al., 2017b). Le due scosse di maggior magnitudo del 20 e del 29 maggio 2012 (rispettivamente $M_w=6.1$ e $M_w=5.9$ secondo Pondrelli et al., 2012), che rappresentano gli eventi più forti mai registrati in questo settore, sono avvenute a profondità, rispettivamente, di 9,5 e 8,1 km (base della successione carbonatica in Figura 5), ed anche le successive scosse maggiori dello scame sismico hanno avuto ipocentri a profondità sempre inferiori a 15 km (Figura 6).

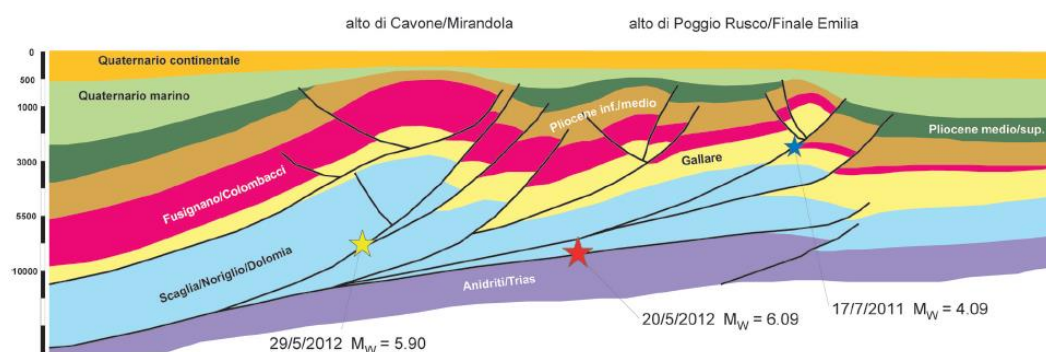


Figura 5 - Sezione geologica attraverso le zone ipocentrali della sequenza sismica emiliana 2012 (da linee sismiche ENI), con proiezione degli ipocentri delle scosse principali (20 e 29 maggio) e della scossa del 17/7/2011. Profondità non in scala. (fonte: Martelli et al., 2017a).

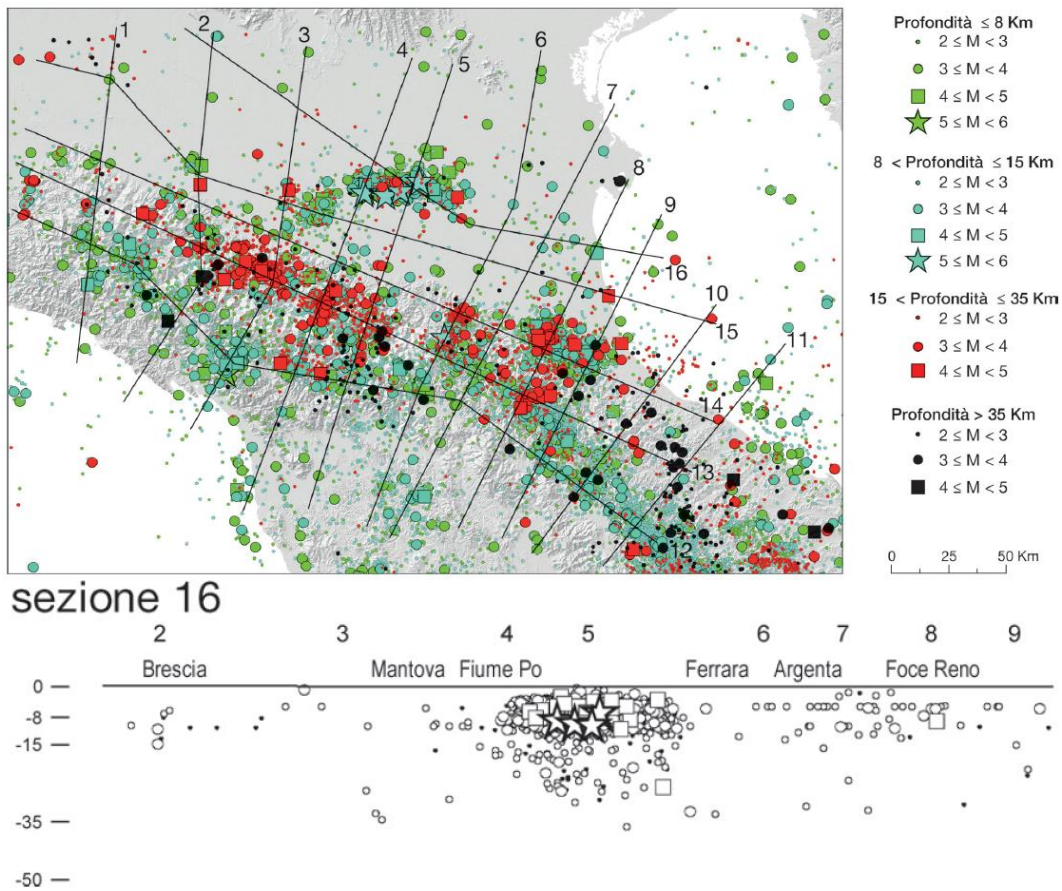


Figura 6 – Sezioni con gli ipocentri ricadenti ad una distanza di 10 km da esse (fonte: Martelli et al., 2017a). Le stelle indicano gli ipocentri delle scosse sismiche di maggior magnitudo registrate in occasione degli eventi del maggio-giugno 2012. Asse delle ordinate della sezione 16: Km da piano campagna.

La soluzione dei meccanismi focali ha mostrato, per questa fascia delle pieghe sepolte, la presenza di un campo deformativo a profondità generalmente inferiori ad 8 ed a 15 km (Figura 7), caratterizzato da eventi sismici con meccanismi focali prevalentemente compressivi e, in maniera minore, trascorrenti, in ogni caso coerenti con una direzione di compressione all'incirca NNE-SSO.

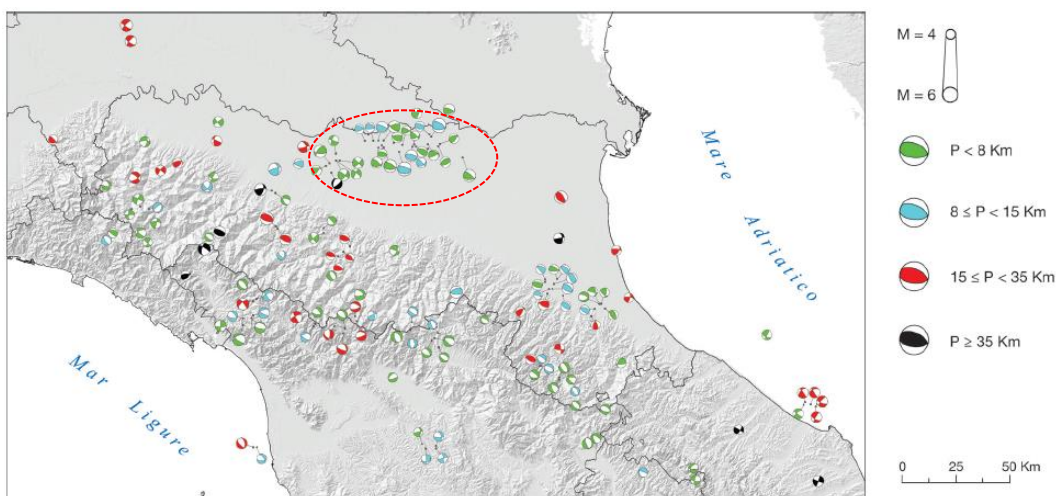


Figura 7 – Mappa dei meccanismi focali dei terremoti con $M_w \geq 4$; la dimensione del simbolo è proporzionale alla magnitudo, il colore indica la profondità ipocentrale (fonte: Martelli et al., 2017a). L'ellisse rossa tratteggiata indica il settore della dorsale interna delle Pieghe Ferraresi.

E' interessante notare che le scosse forti tra il 20 e il 28 maggio 2012 sono per lo più distribuite tra Mirandola e Mirabello, mentre le scosse successive (29 maggio-inizio giugno) sono concentrate soprattutto tra Mirandola e Novi di Modena; ciò sembra indicare che l'attività sia iniziata sul fronte più esterno delle Pieghe Ferraresi per poi trasferirsi progressivamente a quello più interno. Inoltre, alcuni mesi prima, il 17/7/2011 è stata registrata una scossa $M_w=4.79$ localizzata poco a est di Sermide, a bassa profondità. Tale evento, compressivo puro, ben si colloca sul fronte più esterno delle Pieghe Ferraresi e potrebbe essere considerato il primo di una sequenza che ha attivato da nord a sud i *thrust* delle Pieghe Ferraresi (Martelli et al., 2017a).

3.1. Sismicità del territorio comunale

Dal punto di vista sismico, al comune di San Felice è stata assegnata la **classe 3** in base alla DGR 1164 del 23/07/2018, ovvero a bassa sismicità in base alla precedente classificazione conseguente l'Ordinanza del PCM n. 3274/2003 (Figura 8).

La classificazione sismica non interferisce con la determinazione dell'azione sismica, necessaria per la progettazione e la realizzazione degli interventi di prevenzione del rischio sismico. Essa costituisce, altresì, un riferimento tecnico-amministrativo per graduare l'attività di controllo dei progetti e la priorità delle azioni e misure di prevenzione e mitigazione del rischio sismico.

Classificazione sismica dei comuni dell'Emilia-Romagna



Figura 8 - Classificazione sismica dei comuni dell'Emilia-Romagna aggiornata al luglio 2018. Nel cerchio rosso il Comune di San Felice s/P.

Se si analizza la sequenza storica degli effetti macrosismici registrati nel territorio comunale dal database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani - Database Macrosismico Italiano DBMI15 dell'INGV (Locati et al., 2016) - si nota come importanti effetti si siano registrati anche in relazione ad epicentri relativamente lontani dal territorio comunale. Di seguito viene riportata la storia sismica del Capoluogo (Figura 9), limitatamente ai terremoti con intensità epicentrale uguale o superiore a 4, così come estratte dal DBMI15 dell'INGV.

Legenda:

Int. - Intensità al sito (MCS); **Io** - Intensità epicentrale (MCS); **Mw** - Magnitudo momento (epicentrale); **NMDP** - Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7	2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09
7	2012	05	29	07	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90
6	1796	10	22	04			Emilia orientale	27	7	5.45
6	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
6	1987	05	08	11	10	2	Bassa modenese	24	6	4.44
5-6	1910	03	22	23	29		Bassa modenese	15	5	4.16
5	1901	01	20	06	34	2	Bassa modenese	12	5	4.11
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1929	04	20	01	10		Bolognese	109	7	5.36
5	1978	12	25	22	53	4	Bassa modenese	28	5	4.39
5	1987	07	11	01	46	5	Bassa Bolognese	15	5	4.20
4-5	1547	02	10	13	20		Reggiano	7	7	5.10
4-5	1970	11	02	08	42	1	Bassa modenese	3	4-5	3.93
4-5	2011	07	17	18	30	2	Pianura lombardo-veneta	73	5	4.79
4	1887	02	23	05	21	5	Liguria occidentale	1511	9	6.27
4	1901	01	20	06	30		Bassa modenese	10	4	3.68
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
4	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
4	1987	04	24	02	30	2	Reggiano	54	6	4.64

Figura 9 - Osservazioni macrosismiche per San Felice s/P (Locati et al., 2016).

Dai dati si evince come le massime intensità macrosismiche registrate (in gradi MCS) corrispondano:

- al terremoto del 20 maggio 2012, con area epicentrale tra Massa Finalese e Gavello, intensità epicentrale pari a 7 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 6.09,
- al terremoto del 29 maggio 2012, con area epicentrale nei pressi di Medolla, intensità epicentrale pari a 7-8 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 5.9.

In generale, le intensità macrosismiche al sito di maggior grado (tra cui 5 e 6 sono i valori più ricorrenti), sul territorio comunale, sono dovute in gran parte a terremoti con epicentri localizzati nella bassa modenese, che nella maggior parte dei casi si riferisce ad aree comprese all'interno del territorio comunale o nei territori di Mirandola, Cavezzo e Medolla. Intensità al sito di grado <5 sono dovute a terremoti con epicentri localizzati anche a maggiori distanze (aree reggiana, parmense fino a lombardo-veneto e Liguria).

Sovrapponendo gli epicentri dei sismi che hanno dato, storicamente, effetti macrosismici maggiori (MCS \geq 5) all'interno del territorio comunale di San Felice, sulle sorgenti sismogenetiche dell'INGV (Figura 10), è possibile constatare come le maggiori intensità al sito (Int. in Figura 9) siano state determinate da sismi avvenuti all'interno delle sorgenti composite

ITCS051 "Carpi-Poggio Renatico", ITCS103 "Finale Emilia-Mirabello", ITCS049 "Campegine-Correggio", ITCS047 "Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme" e ITCS012 "Malalbergo-Ravenna".

Descrivendo nel dettaglio, quindi, le **sorgenti sismogenetiche**, che in maggior modo possono caratterizzare la sismicità locale, il territorio comunale di San Felice ricade pressoché interamente all'interno della sorgente sismogenetica composta **ITCS051 "Carpi-Poggio Renatico"**, ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **6.0** (derivata dalla massima magnitudo della sorgente individuale associata). La geometria è determinata principalmente sulla base di osservazioni geologiche e geofisiche: lo *strike* varia da 50° a 120°; il *dip* varia da 25° a 45°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,5 a 1,04 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2 e -10 km. Questa sorgente (nello specifico la sua individuale ITIS107 "Mirandola") ha generato il sisma del 29 maggio 2012.

Adiacente verso nord alla ITCS051 è la sorgente sismogenetica composta **ITCS103 "Finale Emilia-Mirabello"**, ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **6.1** (derivata dalla massima magnitudo della sorgente individuale associata). La geometria è determinata principalmente sulla base di osservazioni geologiche e geofisiche: lo *strike* varia da 110° a 120°; il *dip* varia da 40° a 50°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,25 a 0,5 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -3,5 e -10 km. Questa sorgente (nello specifico la sua individuale ITIS134 "Finale Emilia") ha generato il sisma del 20 maggio 2012.

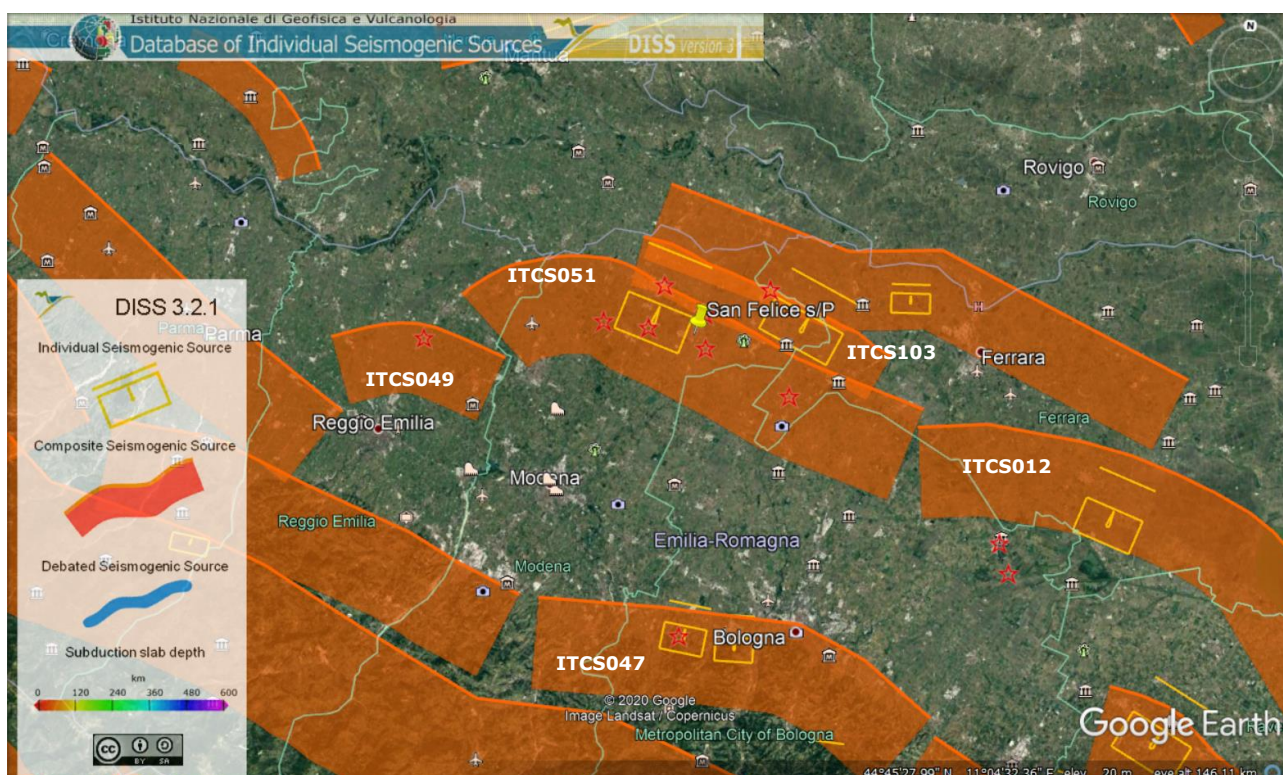


Figura 10 – Estratto dal database of Individual Seismogenic Sources (DISS, versione 3.2.1) dell'INGV: insieme di tutte le sorgenti sismogenetiche composite entro le quali ricadono gli epicentri degli eventi sismici (stelle rosse) che hanno determinato i maggiori effetti macrosismici (MCS \geq) nel territorio di San Felice s/P.

A SO di San Felice è presente la sorgente sismogenetica composta **ITCS049 "Campegine-Correggio"**, ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **5.5** (assunta da dati sismologici regionali). La geometria è determinata principalmente sulla base di dati strutturali

e sismologici: lo *strike* varia da 70° a 110°; il *dip* varia da 30° a 50°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,04 a 0,16 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -3 e -10 km.

A sud, oltre il tracciato della via Emilia, è presente la sorgente sismogenetica composta **ITCS047** "Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme", ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **6.0** (assunta da dati geologici e dall'analisi della sismicità regionale). La geometria è determinata principalmente sulla base di dati geologici: lo *strike* varia da 85° a 135°; il *dip* varia da 20° a 40°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,24 a 0,63 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2 e -8 km.

Le zone epicentrali dei sismi del 1796 e del 1909 potrebbero essere riconducibili all sorgente sismogenetica composta **ITCS012** "Malalbergo-Ravenna", ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **6.0** (basata su dati geologici e dall'analisi della sismicità regionale). La geometria è determinata sulla base di considerazioni su dati geologici regionali: lo *strike* varia da 85° a 150°; il *dip* varia da 20° a 40°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-120°); la *slip rate* varia da 0,49 a 0,55 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2 e -8 km.

Sulla base dell'analisi di pericolosità effettuata dall'INGV³, i valori di PGA attesi, con 10% di probabilità di superamento in 50 anni, variano da 0,125g-0,15g (50° percentile, pari ad una frequenza di superamento annuale di 0,0021) nel settore centro-settentrionale a 0,15g-0,175g nel settore meridionale (Figura 11).

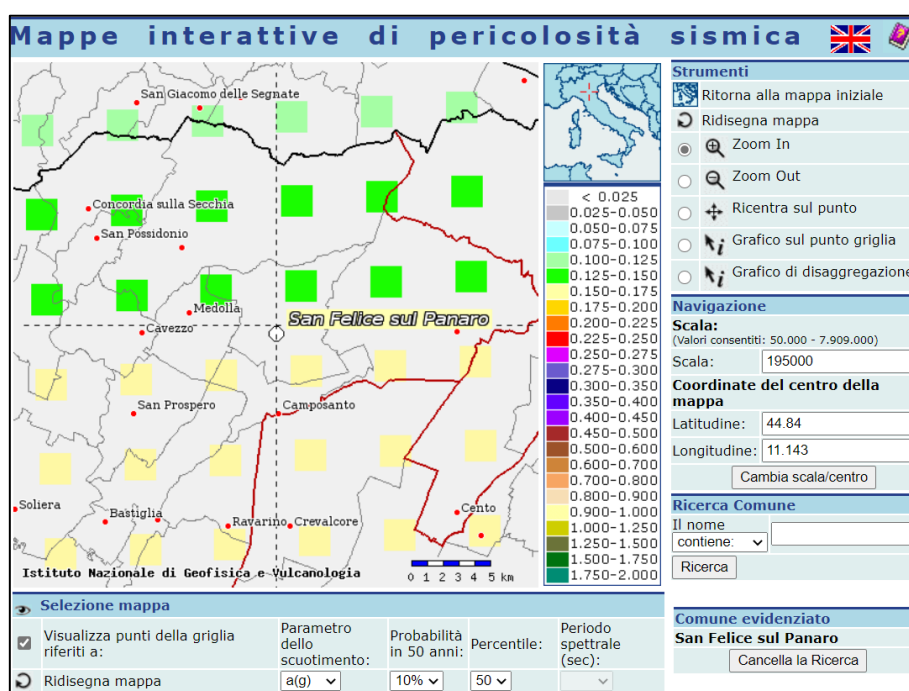


Figura 11 – Valori di PGA attesi per il territorio comunale di San Felice s/P con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni, calcolato dallo studio di pericolosità sismica dell'INGV.

La disaggregazione del valore di a_g con la medesima probabilità di eccedenza (Figura 12) mostra come il contributo percentualmente maggiore (25-30%) alla pericolosità sismica di base del territorio comunale sia determinato da sismi di magnitudo compresa tra 4.5 e 5, con

³ <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

epicentro nei primi 10 km di distanza dal territorio comunale, in grado di produrre PGA pari a 0,27g.

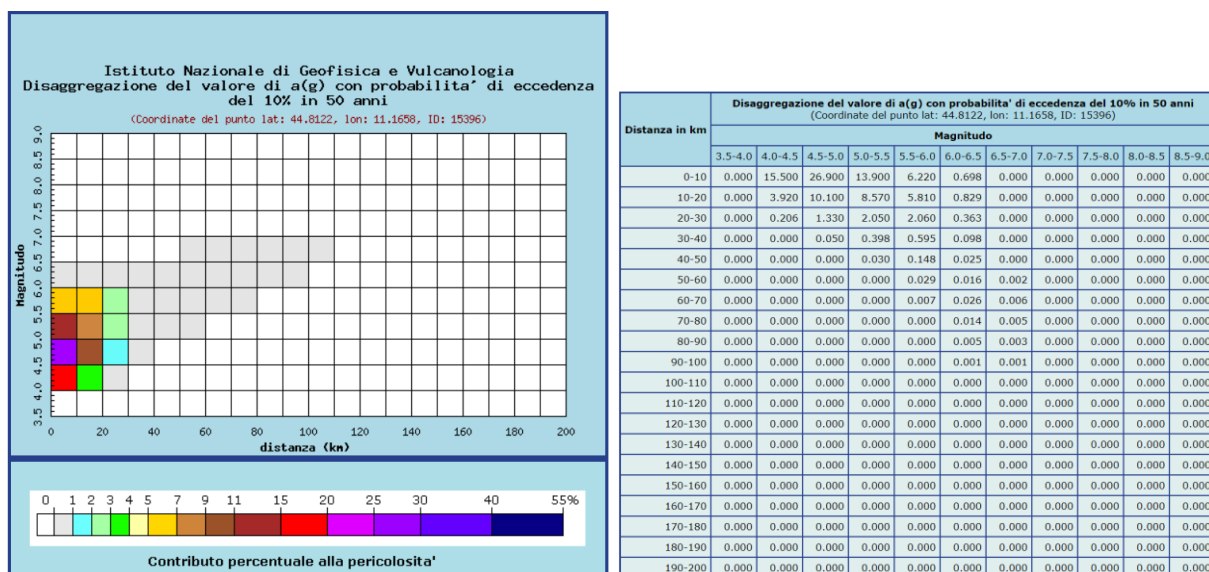


Figura 12 – Disaggregazione del valore di a_g con probabilit  di eccedenza del 10% in 50 anni per il territorio comunale di San Felice s/P.

Il contributo del 15-20% alla pericolosit  sismica di base del territorio comunale   dato dalla coppia (Mw 4-4.5; epicentro 0-10 km), in grado di produrre PGA pari a 0,15g. Contributi percentuali minori alla pericolosit  sono dati dalle coppie:

- (Mw 5-5.5; epicentro 0-10 km) – 11-15%, PGA=0,14g;
- (Mw 4.5-5; epicentro 0-20 km) – 9-11%, PGA=0,1g;
- (Mw 5-5.5; epicentro 0-20 km) – 7-9%, PGA=0,08g.

4. ASPETTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

Per la descrizione degli aspetti geologici e geomorfologici caratteristici dell'intero territorio comunale di San Felice s/P si farà ampio riferimento a quanto già descritto dallo scrivente per il Quadro Conoscitivo del PSC di San Felice.

4.1. Lineamenti geologici generali

L'evoluzione geologica del territorio comunale di San Felice sul Panaro va necessariamente inquadrata in un contesto regionale. Essa ricade nella parte centro-meridionale della Pianura Padana che costituisce, dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-quadernario di tipo sedimentario, che comincia a delinearsi sin dall'inizio del Triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo che nello spazio, in diversi periodi (Mesozoico, Cenozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario), con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali presenti in profondità; più in particolare, l'area ricade nel suo settore appenninico, in diretta influenza del Po e dei suoi affluenti di destra.

Nell'ambito del suddetto bacino, i terreni olocenici, di origine alluvionale, poggiano sul sottostante Pleistocene continentale e/o marino, strutturalmente caratterizzato da elementi ormai sufficientemente definiti in letteratura.

L'assetto geologico strutturale profondo della Pianura Padana è noto soprattutto grazie ai dati emersi dalle perforazioni profonde e dalle prospezioni geofisiche effettuate per le ricerche petrolifere, esposti nelle pubblicazioni di Pieri & Groppi (1981) e Cassano et al. (1986), nelle quali viene aggiornata la sintesi stratigrafica e strutturale dell'area e puntualizzati l'andamento, l'evoluzione e la cronologia degli eventi tettonici dei diversi comparti del bacino.

Dal punto di vista strutturale la Pianura Padana non costituisce una unità omogenea: fanno infatti parte del suo sottosuolo le pieghe più esterne dell'Appennino settentrionale e delle Alpi meridionali lombarde, l'avampaese comune alle due catene e, nel Veneto, l'avampaese della Alpi meridionali orientali e della catena dinarica; su questi elementi è impostata l'avanfossa pliocenico-quadernaria dell'Appennino.

In Figura 13 è riportato un estratto della "Carta degli elementi tettonici significativi dell'area Padana centro-orientale", che mette in evidenza la presenza di un ampio bacino, fortemente subsidente ed attivo sin dal Plio-Pleistocene, che si estende tra Carpi e Cento di Ferrara, denominato "Bacino di Carpi" o meglio noto come "Sinclinale di Bologna-Bomporto-Reggio Emilia", collocata tra due grandi archi di pieghe, che costituiscono la porzione più esterna dell'Appennino settentrionale, rappresentati dalle "Zona delle pieghe pedeappenniniche", a sud, più prossimali alla catena appenninica, e dalla "Dorsale di Ferrara", a nord; quest'ultima è caratterizzata da un'ampia struttura anticlinale molto evidente ed elevata, che corre da Massa Finalese a Mirandola, con direzione complessiva E/SE-N/NW e che, in corrispondenza di Novi di Modena e Correggio, subisce una decisa inflessione verso sud, con andamento SE-NW.

Lungo tali allineamenti, lo spessore dei depositi quaternari subisce una notevole riduzione, sino a poche decine di metri (80/90 m) (Figura 14). In termini generali ed in modo schematico possiamo individuare tre zone principali:

- "Zona delle pieghe pedeappenniniche", dal margine collinare alla Via Emilia, costituita da una successione di sinclinali ed anticlinali, con asse a vergenza appenninica, spesso fagliate e sovrascorse sul fianco Nord;
- "Zona della Sinclinale di Bologna-Bomporto-Reggio Emilia", dove i depositi quaternari raggiungono il loro massimo spessore per tutta la pianura Padana;
- "Zona della Dorsale Ferrarese", alto strutturale costituito da una serie di pieghe associate a faglie dove, in talune culminazioni, lo spessore del Quaternario si riduce a poche decine di metri.

COMUNE DI SAN FELICE S/P - PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA - 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

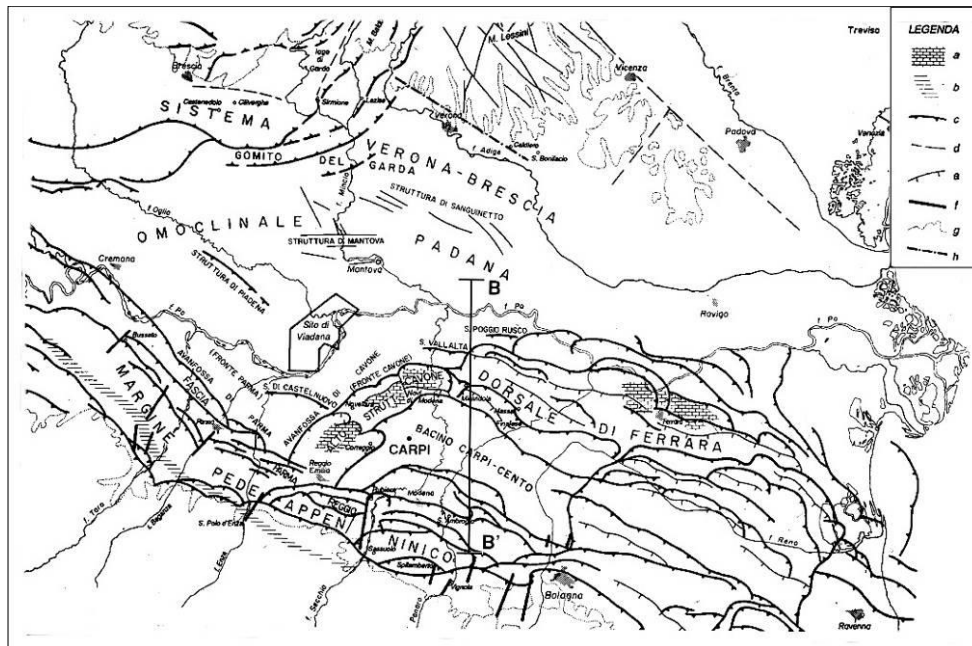


Figura 13 - Carta degli elementi tettonici significativi dell'area Padana centro-orientale. Fonte: L. Serva - (1990).
 Legenda: a) nucleo carbonatico, mesozoico sepolto; b) minimo dell'anomalia gravimetrica; c) accavallamento principale; d) faglia verticale; e) faglia diretta; f) faglia diretta trasversale al margine appenninico; g) limite tra rilievo e pianura; h) faglia di "Verona". B-B': traccia di sezione (rif. Figura 14).

Questo andamento ad archi di pieghe del fronte sepolto dell'Appennino, di messa in posto sempre più recente man mano si procede verso le aree più esterne, è da correlarsi con il movimento di rotazione della catena appenninica in senso antiorario, che genera raccorciamenti crostali di crescente intensità spostandosi dai settori occidentali a quelli orientali.

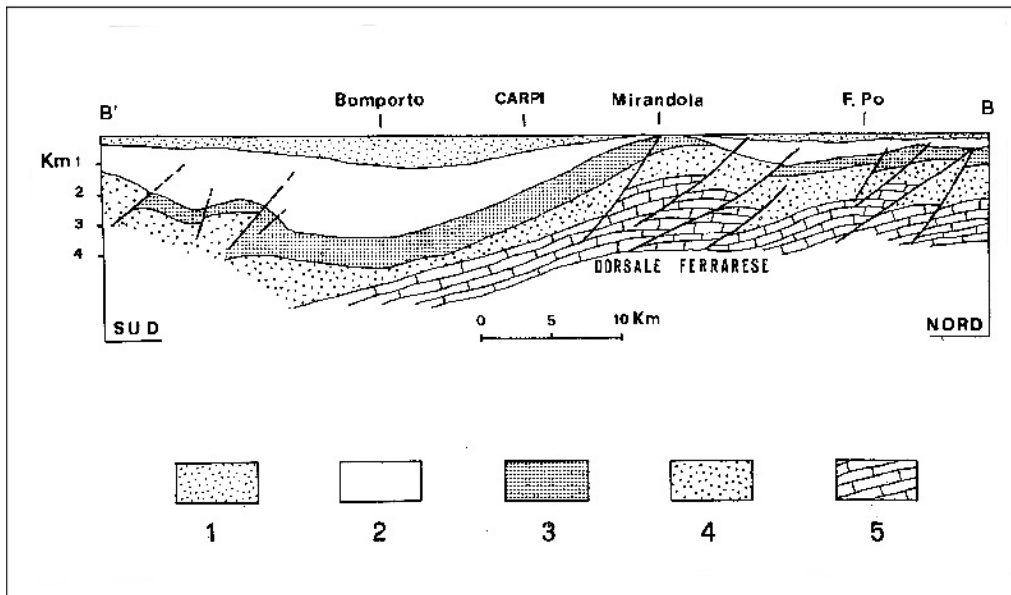


Figura 14 - Sezione geologica schematica, indicativa della situazione strutturale profonda della bassa pianura modenese. Fonte: Pieri (1980). Legenda: 1) depositi alluvionali; 2) sedimenti marini del Pliocene superiore e Quaternario; 3) sedimenti marini del Pliocene inferiore; 4) sedimenti marini del Paleocene-Miocene; 5) formazioni calcareo marine del Mesozoico.

Da un punto di vista stratigrafico, la sedimentazione terziaria e quaternaria in quest'area della pianura è stata essenzialmente detritica: si sono cioè deposte serie clastiche di considerevole

spessore e solo nel Messiniano si riscontra un episodio evaporitico; si possono riconoscere essenzialmente due cicli di sedimentazione, distinguendo una zona marginale, in cui ad una deposizione clastica grossolana succedono sedimenti prevalentemente argillosi ed una zona centrale, in cui prosegue una sedimentazione torbiditica indisturbata.

La deposizione sedimentaria presenta inoltre frequenti variazioni di facies, sia laterali che verticali, come risultato delle particolari condizioni strutturali venutesi a creare in vari settori della pianura in seguito all'evoluzione tettonica.

Alla deposizione della facies evaporitica miocenica superiore, corrisponde una fase di marcata regressione e ad essa si accompagna probabilmente una fase tettonica di notevole intensità.

Il piegamento pedeappenninico e l'abbassamento del livello del mare portano all'emersione delle culminazioni delle principali anticlinali, tra le quali la Dorsale Ferrarese, ove s'instaurano rilevanti processi erosivi che provocano la scomparsa di spessori anche notevoli di sedimenti.

Nel tardo Messiniano e nel Pliocene inferiore si manifesta un graduale innalzamento del livello delle acque del bacino, che porta al ristabilimento graduale delle condizioni che regnavano in precedenza; come conseguenza si ha la deposizione di successioni trasgressive su aree precedentemente emerse, mentre nelle zone sinclinaliche continuano a deporsi sedimenti torbiditici.

Al termine del Pliocene inferiore, un'accentuata attività tettonica porta ad un nuovo piegamento e sollevamento dell'area e quindi all'accentuarsi di alcune strutture preesistenti; nelle aree altimetricamente più elevate, tra cui Camurana ed altri tratti della Dorsale Ferrarese, s'instaurano sensibili fenomeni erosivi.

Con il Pliocene medio inizia una nuova ingressione marina di limitata entità, che comporta la deposizione, nelle aree sinclinaliche, di depositi torbiditici grossolani.

Il Quaternario segna un abbassamento regionale all'interno del bacino padano, accentuandosi ulteriormente la subsidenza differenziale delle diverse strutture; la potenza dei sedimenti del Quaternario varia da oltre 1000 m nelle aree meridionali a meno di 200 m o completa assenza, in quelle settentrionali. La diversità di spessore è imputabile alla marcata differenza di subsidenza cui l'area in oggetto è stata sottoposta durante il Quaternario.

Il Quaternario si chiude poi con una decisa regressione del dominio marino, con il passaggio da una sedimentazione di tipo marino, che caratterizza il Pliocene e parte del Pleistocene, ad una di tipo continentale, con il colmamento del golfo padano, che si trasforma progressivamente in pianura alluvionale attraverso l'accumulo di sedimenti fluviali e fluvio-glaciali, derivanti dal rapido smantellamento e modellamento delle catene montuose circostanti.

Focalizzando l'attenzione sulla zona in esame, si osserva in Figura 15 che il territorio di San Felice ricade nella zona delle "pieghe ferraresi". Lo spessore della successione plio-quaternaria, cioè dei sedimenti che si sono depositati negli ultimi 5 milioni di anni (dalla base del Pliocene ad oggi) risulta abbastanza variabile: da oltre 3.000 m nella zona più meridionale esso si riduce, alla cerniera della piega-faglia ferrarese, fino a meno di 1.000 m (porzione centrale e settentrionale del territorio comunale).

Per quanto riguarda l'area comunale, essa ricade in un settore deposizionale caratterizzato dai depositi alluvionali del fiume Po, presenti in massima parte nelle aree più a nord, e dei corsi d'acqua minori di tipo appenninico, ed in particolare del fiume Panaro e Secchia; si tratta di depositi di origine continentale a granulometria solitamente medio-fine, con prevalenza di litologie generalmente sabbiose, per quanto riguarda i depositi del fiume Po, caratterizzati da uno spessore via via decrescente procedendo verso sud, e di depositi limosi e argillosi, con intercalazioni di livelli e lenti sabbiose discontinue, per quanto riguarda le alluvioni del fiume Panaro.

Lo spessore della coltre alluvionale è variabile e comunque non superiore ai 200 m.

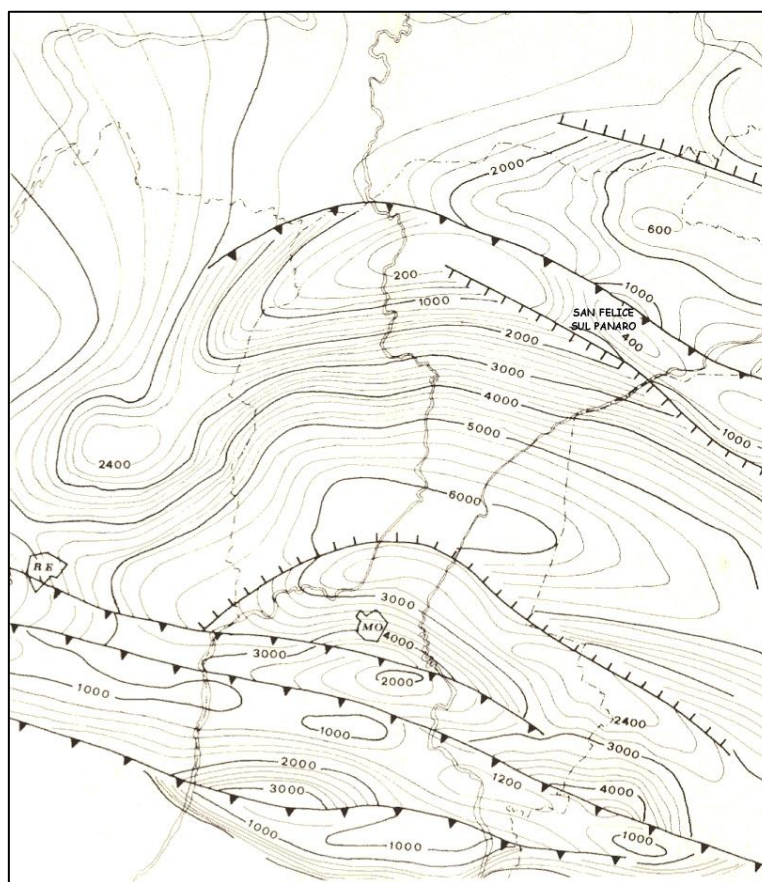


Figura 15 - Carta delle isobate della base del Pliocene. Fonte: M. Pellegrini, A. Colombetti & A. Zavatti (1976) - Idrogeologia profonda della pianura modenese - Quaderni dell'istituto di ricerca sulle acque - C.N.R.

Il riempimento della Pianura Padana ad opera dello smantellamento delle catene alpina ed appenninica ha portato quindi all'accumulo di depositi dapprima marini e successivamente continentali di piana alluvionale in un bacino sedimentario che ha subito una notevole azione di subsidenza. Come già detto modalità e tempi di deposizione dei materiali sono stati controllati principalmente dalla tettonica e, dal Pliocene medio-superiore ad oggi, dall'evoluzione delle pieghe-faglie descritte in precedenza e schematizzate nelle figure riportate, segnalata anche in epoca storica dal graduale "sfuggire" della rete idrografica superficiale alla "dorsale ferrarese", come verrà meglio descritto nel paragrafo successivo. I movimenti tettonici, soprattutto quelli ad andamento verticale, sono quindi uno dei principali fattori di controllo dello sviluppo paleogeografico dell'area padana, influenzando direttamente morfologia e geometria dei corsi d'acqua, anche se non vanno dimenticati altri fattori determinanti dovuti alle oscillazioni climatiche, quali le variazioni del livello marino e del regime dei corsi d'acqua.

4.2. Assetto geomorfologico

Il territorio di San Felice si colloca nella fascia di media e bassa (al limite nord-orientale) pianura alluvionale, in cui l'azione morfogenetica predominante è determinata dai corsi d'acqua, oltre che, in tempi più recenti, dall'azione antropica. Si potrebbe anzi affermare che l'intervento antropico di bonifica, che si è andato sempre più intensificando dall'età preromana in poi, ha in gran parte modificato e poi interrotto l'evoluzione degli eventi naturali, diminuendo fino in pratica ad annullare la dinamica evolutiva del reticolo idrografico.

In generale, il modello di pianura alluvionale caratteristico di tutta la media e bassa pianura emiliano-romagnola, interessata da fiumi e torrenti appenninici, è abbastanza semplice: prima

dei massicci interventi di regimazione idraulica che hanno portato alla costruzione degli argini artificiali, la dinamica della zona era caratterizzata da frequenti modifiche e divagazioni degli alvei fluviali, dovute alle ricorrenti rotte e tracimazioni dei corsi d'acqua, che scorrevano pensili rispetto alla piana circostante in alvei formati dalla naturale azione di deposito degli stessi. Nel caso di rotte e tracimazioni le acque inondavano i territori adiacenti l'alveo, depositando sedimenti più grossolani (es. sabbie e sabbie limose) nelle vicinanze dello stesso e sedimenti più fini (limi e argille) nelle zone distali, a seguito della progressiva riduzione della capacità di trasporto. L'azione di deposito così descritta provocava un graduale accrescimento dell'area, con un innalzamento progressivo del canale rispetto alle zone circostanti, dove invece arrivavano acque di esondazione a carico solido già ridotto sia quantitativamente che granulometricamente. Inevitabilmente, e per svariate cause, il corso d'acqua poteva ad un certo punto abbandonare il proprio alveo per un tracciato impostato in aree più depresse, per poi ricominciare l'innalzamento di un nuovo edificio pensile.

Secondo questo modello, schematizzato in Figura 16, l'accrezione della pianura avviene perciò sia orizzontalmente, con il giustapporsi di successivi corpi d'alveo, sia verticalmente, a causa di continui cicli di riempimento dei bacini di esondazione.

La pianura risulta dunque costituita da un intrecciarsi di lenti a tessitura prevalentemente sabbiosa, corrispondenti a corpi d'alveo sepolti, e di sedimenti fini (limi ed argille) determinati dai riempimenti dei bacini interfluviali di esondazione.

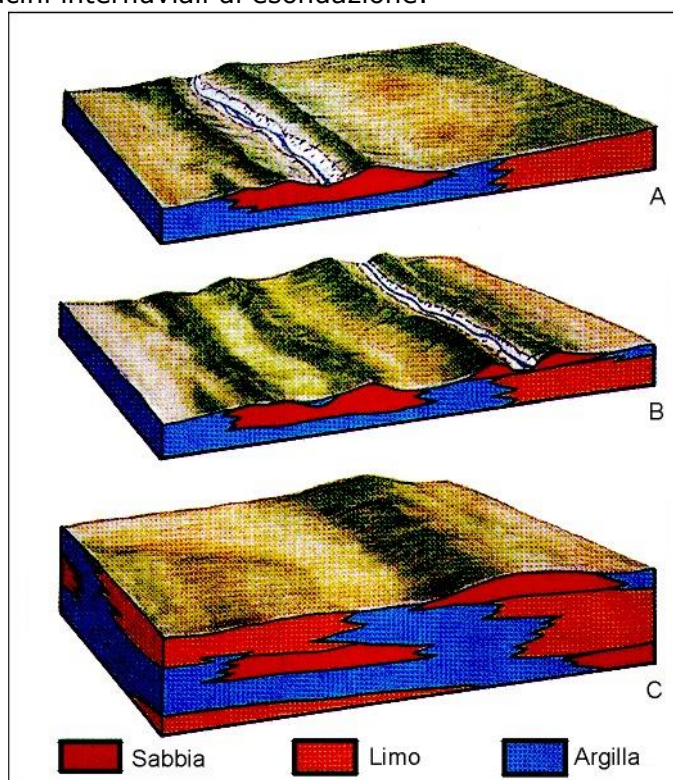


Figura 16 - Evoluzione morfologica di un corso d'acqua in un'area di piana alluvionale in una situazione non ancora regolata dall'uomo, cioè "naturale" Fonte: Pellegrini M. (1990) - I Navigli e la rete idrografica negli antichi ducati estensi di Modena e Reggio Emilia.

4.2.1. Evoluzione idrografica

Da fonti bibliografiche si possono desumere informazioni circa l'evoluzione paleo-idrografica dei fiumi principali nell'area di studio, sulla base della successione delle vicende idrografiche testimoniate dai paleoalvei (Figura 17).

Nel Pleistocene, dopo l'emersione della Pianura Padana, il F. Po, ad est di Guastalla (R.E.) seguiva un percorso molto più meridionale rispetto all'attuale, secondo la direttrice Carpi-Nonantola-S. Giovanni in Persiceto, mentre nell'età del bronzo, attorno al I millennio a.c., si biforcava tra Brescello e Guastalla o ad est di Casalmaggiore, a seconda degli autori, dando luogo ad un ramo principale (Po di Adria) e ad uno o più rami minori subparalleli, lungo una fascia limitata a sud dalle attuali località di Poviglio, Concordia sulla Secchia, Bondeno e Ferrara. In età romana imperiale e sino all'alto medioevo (VII-X sec.) l'alveo principale del fiume Po, dopo aver lambito Brescello, entrava in territorio mantovano; nel giro di pochi secoli tende tuttavia a spostarsi ancora verso nord, creando una situazione di disordine idrografico. A partire dalla seconda metà del XII sec. la situazione cambia radicalmente: con le deviazioni di Luzzara e Ficarolo il fiume assume un andamento del tutto simile all'attuale.

Per quanto riguarda l'evoluzione degli affluenti appenninici del Po, sembra ormai certo che il F. Secchia nell'età del bronzo si dirigesse da Rubiera a Carpi fino a S. Prospero con una direzione subparallela a quella attuale, per poi ruotare ad est da Cavezzo, assumendo una direzione all'incirca W-E coincidente con la direttrice San Felice s/P-Finale Emilia-Casumaro-Vigarano Mainarda, fino a Ferrara, dove si immetteva in Po dopo avere ricevuto le acque del Panaro e del Reno. In età romana mantiene all'incirca lo stesso corso fino a Cavezzo, mentre da qui a Finale Emilia si sposta verso Mirandola (cioè verso nord), anche se nel complesso risulta ancora valida la direttrice Cavezzo-Vigarano Mainarda. Fino ai secoli XII e XIII il Secchia, a nord di Modena, risulta suddiviso in più rami (Sicla, Muclena, Aqualonga, gli attuali Cavo Lama e canale di Carpi) con direzione circa S-N; all'altezza di Cavezzo, in corrispondenza della già rilevata rotazione verso est, ha seguito nel tempo vari percorsi, tra i quali quello del Dosso di Cavezzo-Medolla-S. Felice S.P.-Rivara-Massa Finalese-Finale Emilia, dove, insieme al Naviglio di Modena e talora forse anche al Panaro, proseguiva verso Bondeno, affluendo nel Po di Ferrara. Nel XIII sec. o addirittura, secondo Lombardini, tra il 1288 ed il 1360, si verifica la diversione del Secchia direttamente in Po attraverso Quistello, dove fu inalveato nell'antico alveo del Po, anche se secondo alcuni autori tale inalveazione non corrisponderebbe all'attuale.

È certo comunque che a partire dall'inizio del XVI sec. anche il Secchia ha praticamente assunto il tracciato attuale.

Il F. Panaro durante l'età del bronzo scorreva nel suo tratto più meridionale secondo la direttrice Piumazzo-Manzolino-S. Giovanni in Persiceto e nel suo tratto più a valle, prima di confluire in Secchia a Finale Emilia, corrispondeva agli alvei del centese che saranno occupati dal F. Reno a partire dal XII sec. d.c.

In età romana scorreva presumibilmente nel tratto più a monte lungo la direttrice S. Cesario S.P.-Nonantola, ad est dell'alveo attuale, per poi svilupparsi nelle valli di Crevalcore e confluire in Secchia nella zona di Finale E.

Nell'alto medioevo il fiume tende ad avvicinarsi, nel suo tratto a monte, al corso attuale, mentre tra Crevalcore e Finale E. occupa l'alveo dell'attuale Scolo Panarazzo, alveo che rimarrà attivo fino al XII sec. d.c.

Nel basso medioevo viene immesso nel corso praticamente attuale da S. Ambrogio, quindi fino a Bomporto non vi sono più state mutazioni di rilievo; da Bomporto il fiume fletteva invece verso E, e con uno o più corsi arrivava nelle valli a nord di Crevalcore, quindi a Finale E. ed infine a Bondeno, seguendo il "Ramo della Lunga". È intorno al 1347 (o poco più tardi, secondo alcune testimonianze) che viene immesso nel Naviglio presso Bomporto, assumendo praticamente la configurazione attuale. Da notare che tutto il basso corso del Panaro, compreso il Ramo della Lunga di Finale, soppresso il secolo scorso, corrisponde all'alveo medioevale del F. Secchia (Pellegrini, 1990).



Figura 17 - Evoluzione della rete fluviale tra Mantova e Modena (da Castaldini, 1989 modif.) - Fonte: Panizza et al. (2004). Legenda: 1) idrografia abbandonata di età moderna, 2) idrografia abbandonata di età medioevale, 3) idrografia abbandonata di età romana, 4) idrografia abbandonata di età del Bronzo, 5) principale deviazione fluviale e indicazione della sua età, 6) principale taglio di meandro e indicazione della sua età, 7) indicazione di dominio fluviale: Po = Po, E = Enza, C = Crostolo, T = Tresinaro, S = Secchia, P = Panaro, M = Mincio, O = Oglio, 8) principale scarpata fluviale, 9) depositi fluvioglaciali e fluviali tardo pleistocenici con tracce di paleoalvei, 10) formazioni pre-quaternarie del margine appenninico. Il cerchio rosso evidenzia il territorio di San Felice.

4.2.2. Contesti geomorfologici

Nel tratto di pianura nel quale è inserita l'area comunale possono delinearsi due differenti contesti geomorfologici: il primo, posto a sud della linea Novellara-Novì e Mirandola-Finale Emilia, in cui rientra la fascia più meridionale del territorio comunale, è contraddistinto da una quasi assenza di elementi morfologici direttamente osservabili in campagna; questi, quando presenti, seguono una direttrice prevalente N-S.

Il secondo contesto, posto a nord di tale allineamento, presenta una situazione morfologica del tutto differente, con la presenza di diversi elementi morfologici, ad orientazione prevalente O-E, da considerarsi relativamente giovani e quindi rilevabili in campagna (e soprattutto attraverso la foto-interpretazione) con una certa immediatezza. In questo contesto, nel quale rientra la restante parte del territorio comunale, il primo elemento di rilievo è rappresentato dal cosiddetto "dosso di Finale", che appare evidentemente connesso con il corso del fiume Secchia, poiché si distacca da questo con direzione SO-NE nella zona di San Prospero – Cavezzo – Mirandola, deviando poi verso est, dove va a toccare il territorio di San Felice, Massa Finalese e Finale Emilia, ricollegandosi poi all'ex alveo del Panaro (Panaro abbandonato) e, proseguendo, ad altri elementi morfologici in destra del Panaro attuale. A nord di tale dosso si ha la prima grande depressione della pianura modenese-mantovana, nella quale le quote del terreno raggiungono valori nettamente inferiori rispetto a quelli dei territori posti sia a sud, che a nord; all'interno del territorio comunale si toccano quote minime di 9,5 m s.l.m. all'estremità nord-orientale, che rientra, a tutti gli effetti entro tale depressione.

Dal punto di vista topografico l'area comunale presenta una morfologia insospettabilmente varia se si tiene conto che si colloca nella bassa pianura; le quote variano all'interno del territorio tra i 20.0 – 20.5 m s.l.m. dell'estremità occidentale (zona a ovest di San Biagio), ai 9.5 – 10.0 m s.l.m. della zona nord-orientale (loc. "Il Cristo delle Valli), con graduale decremento spostandosi da ovest verso est.

In senso nord-sud, si riconosce una fascia, posta lungo l'allineamento San Biagio-Rivara, dove le quote del terreno risultano più rilevate e due fasce marginali, poste a sud e nord, dove le quote del terreno presentano valori nettamente inferiori, con differenze anche di 4.0 – 5.0 m.

Come già accennato, il territorio comunale è compreso nella zona della "bassa pianura", che si estende dalla curva di livello dei 20.0 m fino al limite settentrionale della provincia, raggiungendo nei pressi del Fiume Po quote prossime al livello del mare; la bassa pianura, che occupa circa il 20% del territorio provinciale, è caratterizzata dalla presenza di strisce rilevate, dette "dossi", corrispondenti ad alvei antichi od attuali pensili sulla pianura circostante e da zone depresse, dette "valli", all'interno delle quali l'acqua tenderebbe a ristagnare, se non allontanata dai canali di bonifica. I dossi e i paleo-dossi sono di forma generalmente allungata e sinuosa, poco rilevanti e dolcemente raccordanti alle superfici adiacenti.

Con particolare riferimento alla carta della "Geomorfologia" (tavola QC.5/t2), all'interno del territorio comunale si individua la presenza di alcune zone più rilevate, individuabili come paleo-dossi di accertato interesse (vedi "dosso di Finale") o paleo-dossi di modesta rilevanza; la forma principale, costituita dal cosiddetto "dosso di Finale", si sviluppa con andamento E-O passando per l'abitato di San Biagio, per poi flettere, nella zona orientale verso l'abitato di Rivara, dove tuttavia risulta essere meno evidente e di minor rilevanza.

Tale dosso costituisce, in realtà, la parte terminale di un più complesso sistema morfologico, che si diparte dall'ansa fluviale dell'alveo attuale del Secchia presente appena a S dell'abitato di Cavezzo, prendendo inizialmente una direzione NE fino all'abitato di Medolla, da dove piega verso est dando luogo a numerose diramazioni secondarie, di cui la maggior parte piuttosto brevi e di ampia sezione, si sviluppano sia verso nord che verso sud, mentre il ramo principale, via via sempre più ridotto in dimensione, si prolunga verso est fino a Massa Finalese, dopo aver descritto un'ampia ansa a nord di S. Felice sul Panaro, il cui centro storico sorge a sua volta su una delle sue diramazioni secondarie.

Giunto in zona S. Felice, Massa Finale, Finale Emilia, la struttura di dosso va a ricollegarsi all'ex-alveo del Panaro ("Panaro abbandonato") e ad altri elementi morfologici in destra del Panaro attuale.

Altri due rami cospicui sono serviti per l'insediamento di Mortizzuolo e di Pavignane e delle relative infrastrutture storiche.

A nord di tale “dosso” si ha la prima grande depressione della pianura modenese-mantovana (“valle Le Partite”) nella quale le quote raggiungono valori minori (anche 8.0 m s.l.m.) rispetto ai terreni situati sia a nord che a sud; la porzione nord-orientale del territorio comunale rientra all’interno di tale struttura di “valle di pianura”, con quote che raggiungono valori minimi di 9.5 m s.l.m. all’estremità settentrionale.

Il sub-sistema dei dossi Cavezzo-Medolla-Massa Finalese rappresenta quindi una sorta di antico delta, nel quale erano probabilmente presenti più rami attivi contemporaneamente che davano luogo alle valli Le Partite, ora bonificate ma ancora riconoscibili dall'altimetria depressa, dalla cospicua artificializzazione del sistema idraulico, dall'ordinamento colturale nonché dalla scarsa concentrazione insediativa.

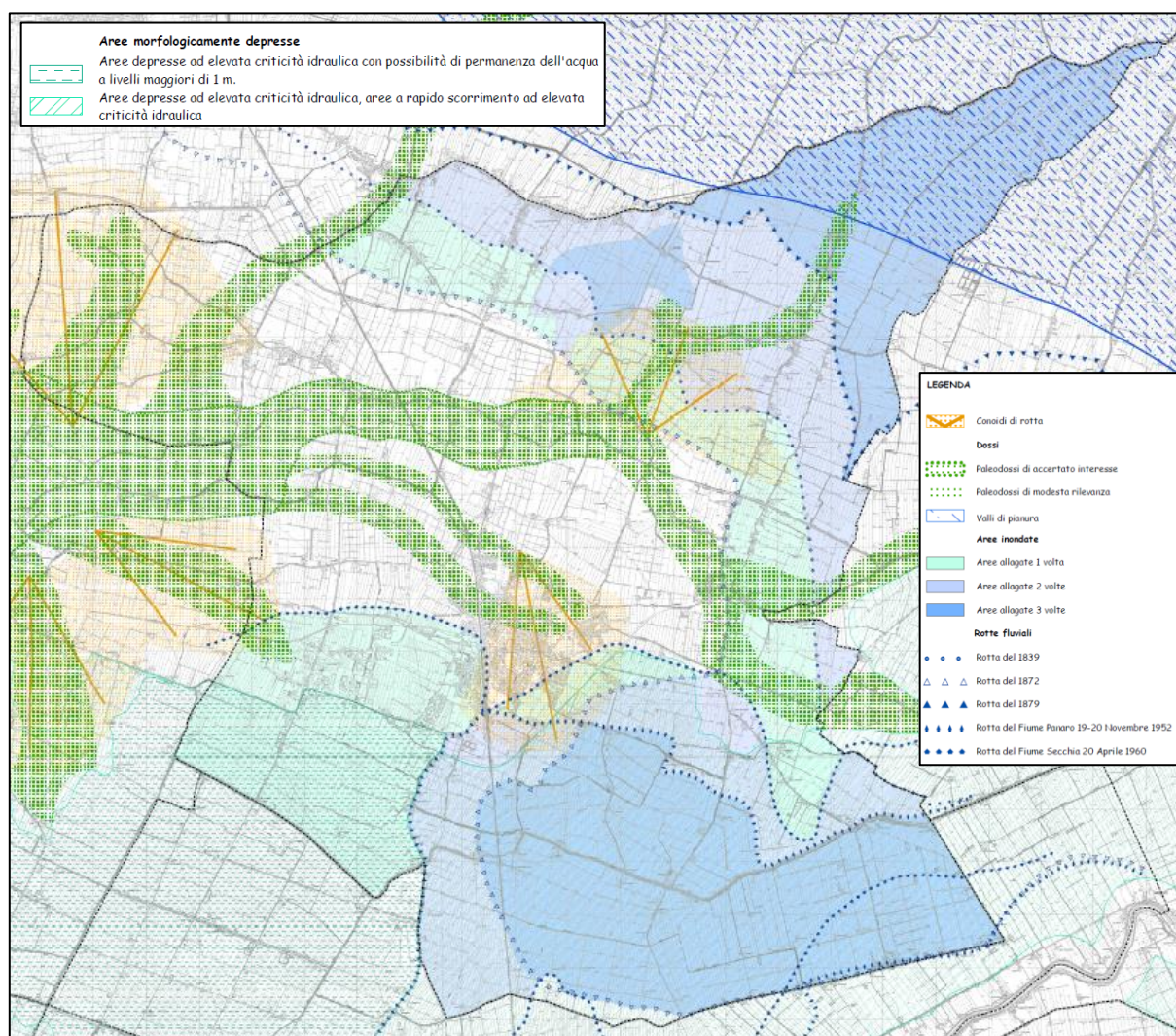


Figura 18 – Tavola QC.5/t2 “Geomorfologia” del QC/PSC del Comune di San Felice s/P (2006).

La distribuzione dei paleoalvei e, più in generale, delle unità geomorfologiche degli argini naturali e dei bacini interfluviali ha condizionato e condiziona tuttora sia l’assetto idraulico di superficie che la distribuzione degli insediamenti antropici, soprattutto storici: le strutture rilevate (paleoalvei), vere e proprie direttrici geomorfologiche, sono state infatti sede preferenziale dello sviluppo insediativo e viario, a causa della migliore difesa dalle esondazioni e delle migliori condizioni geotecniche dei terreni; al contrario le aree depresse, specie nelle zone di vera e propria conca, sono state sede di paludi ed acquitrini fino alla avvenuta bonifica. Le conche morfologiche rappresentano ancora le aree di maggior rischio idraulico, non solo in caso di esondazione ma anche nel caso di eventi pluviometrici di eccezionale durata e/o

intensità, che possono mettere in crisi la rete scolante o produrre ristagni di acqua, favoriti anche dalla scarsa permeabilità della litologia di superficie.

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Oltre gli aspetti geologico-strutturali generali descritti nel capitolo 4 di questa relazione, a seguire si cercherà di fornire un quadro litostratigrafico di maggior dettaglio per il territorio comunale, attingendo alla documentazione reperibile dalle fonti ufficiali.

Per il territorio comunale di San Felice non vi è disponibilità di sezioni geologiche rappresentative: la Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 manca del Foglio 184 "Mirandola" entro cui ricadrebbe il territorio di San Felice, mentre la stessa Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000, nel Foglio 75 "Mirandola", possiede una sezione geologica, ma passante per Medolla e con scala verticale molto piccola, non sufficiente per un esame di dettaglio.

Il Servizio Geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna, nel web-GIS delle sezioni geologiche e prove geognostiche della pianura emiliano-romagnola non mostra alcuna sezione in grado di rappresentare la litostratigrafia locale.

Lo stesso Servizio Geologico regionale ha comunque messo a disposizione dello scrivente una sezione geologica recentemente costruita dal Servizio stesso e già utilizzata nello studio, approvato, di microzonazione sismica di III livello del Comune di Camposanto come rappresentativa della litostratigrafia del territorio di Camposanto.

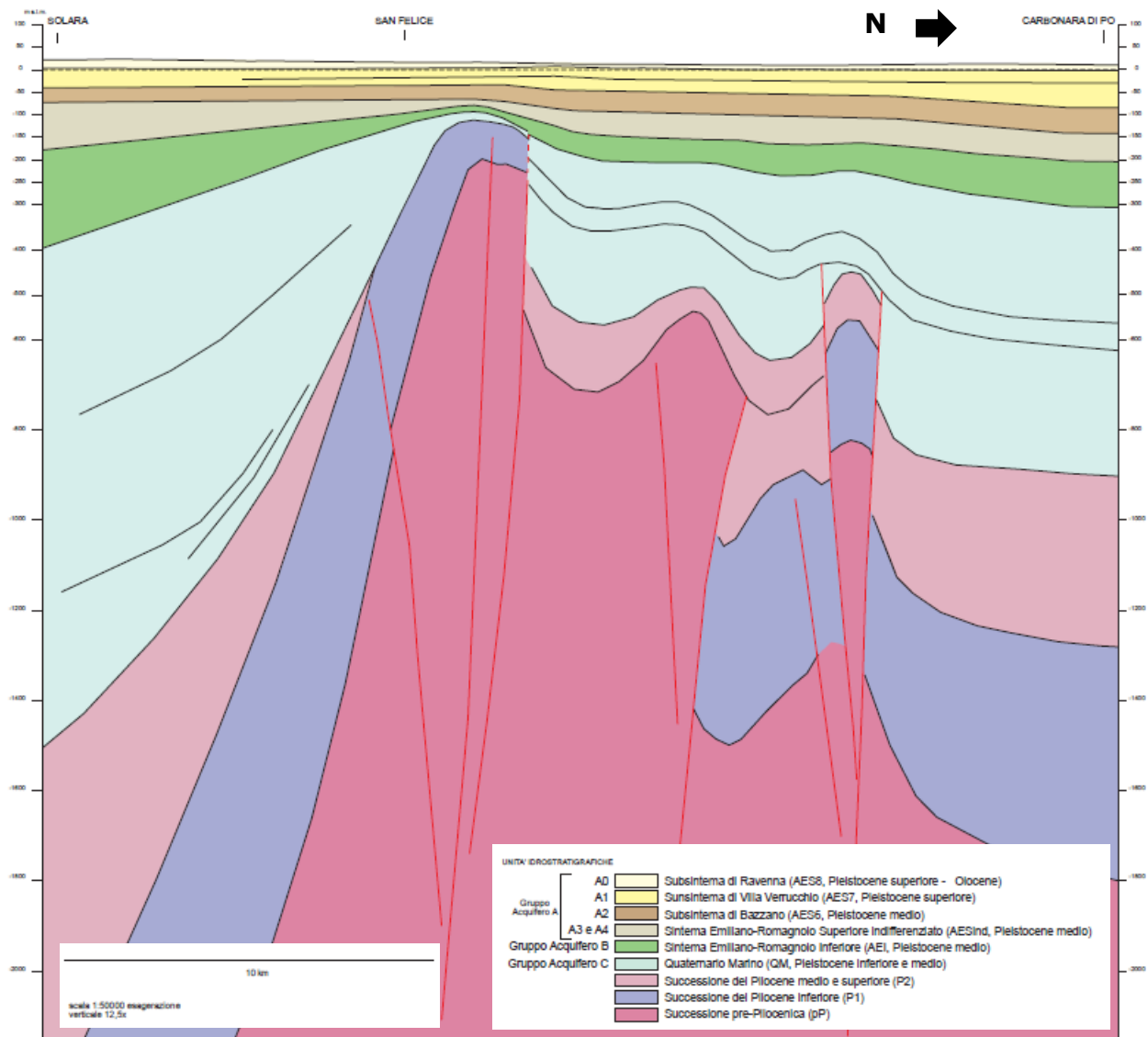


Figura 19 – Sezione geologica "Solara-San Felice-Carbonara di Po" (non pubblicata), realizzata dal Servizio Geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna.

La sezione, denominata "Solara-San Felice-Carbonara di Po" (Figura 19 e Allegato 2) attraversa il territorio di San Felice nel suo settore occidentale, dando quindi un quadro di grande dettaglio su quella che è la stratigrafia profonda del territorio fino alla Successione pre-Pliocenica.

La sezione fa emergere molto chiaramente, grazie anche all'esagerazione verticale, il passaggio, a nord del Capoluogo, dell'anticlinale per propagazione di faglia, sepolta - parte interna del più esteso sistema delle Pieghe Ferraresi - che nella "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe a scala 1:250.000" (Martelli et al., 2017a) mostra una flessione verso SE fino a scomparire poco oltre Rivara. In zona di cerniera la presenza dell'anticlinale ha come effetto un marcato assottigliamento della successione stratigrafica, soprattutto negli strati del Quaternario marino e del Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore.

In base alla sezione (Figura 19, Allegato 2), in corrispondenza dell'abitato di San Felice, la profondità della base del Quaternario continentale (Qc) è a circa 140 m dal piano campagna e si riduce a circa 90 m procedendo verso nord, in corrispondenza dell'area di cerniera dell'anticlinale, per poi approfondirsi nuovamente.

La stessa profondità di 140 m della base del Qc viene evidenziata dalla stratigrafia del pozzo Agip "Bignardi 1", eseguito presso S. Biagio. Procedendo verso est, in prossimità degli abitati di Pavignane e Rivara, i due pozzi Agip "Rivara 1" e "San Felice sul Panaro 1" intercettano la base del Qc a circa 150 m. Nel settore meridionale del territorio, in prossimità di Dogaro, la base del Qc si approfondisce ancor più sino a raggiungere circa 220 m (pozzo Agip "Dogaro 2").

I risultati di una recente campagna di sismica a riflessione effettuata nel territorio di Cavezzo (Petronio et al., 2018) hanno permesso di identificare velocità delle onde sismiche "S" (nella loro componente orizzontale) che **nei primi 240 m dal piano campagna si mantengono sotto 500 m/s**; solo nei sedimenti del Quaternario marino (Qm) le velocità aumentano ad oltre 700 m/s (Figura 20). Valori che trovano riscontro nelle misure Down-hole eseguite a Medolla e a Mirandola da Martelli e Romani (2013). Chiaramente, ciò che differenzia le varie aree indagate è la profondità a cui si colloca l'interfaccia Qc/Qm che, come detto, trova i suoi valori minimi in corrispondenza dell'alto strutturale sepolto; in particolare, nell'alto di Mirandola lo spessore di Qm quasi si annulla, lasciando il Qc quasi a contatto con il Pliocene superiore.

La microzonazione sismica di III livello del Comune confinante di Camposanto ha adottato l'interfaccia Qc/Qm quale bedrock sismico.

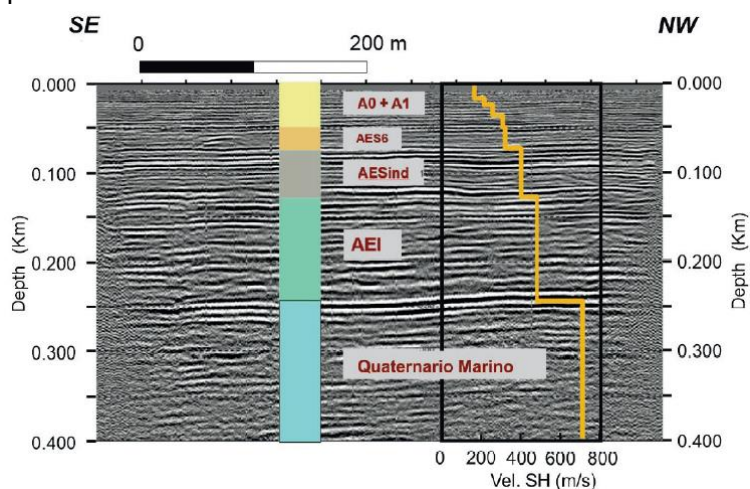


Figura 20 – Modello del profilo di V_{SH} (linea gialla) sovrapposto ai dati di sismica a riflessione eseguita a Cavezzo e confrontato con le unità stratigrafiche della successione locale. Fonte: Petronio et al. (2018).

Il recente studio di Mascandola et al. (2019) ha stimato, tramite una vasta campagna di misurazioni HVSR sull'intera pianura emiliano-romagnola, una profondità del bedrock sismico, per l'area di San Felice, compresa tra 100 e 150 m dal piano campagna. In Figura 21, gli stessi autori mostrano la variazione della profondità del bedrock sismico da ONO verso ESE, di cui si può apprezzare una tendenza ad un progressivo approfondimento a partire da Mirandola in direzione ESE. Inoltre, in corrispondenza di San Felice, le discontinuità Y (0,45 Ma) ed R (0,8 Ma) si trovano ad essere molto vicine tra loro, grazie alla riduzione di spessore dovuta alla presenza dell'alto strutturale sepolto.

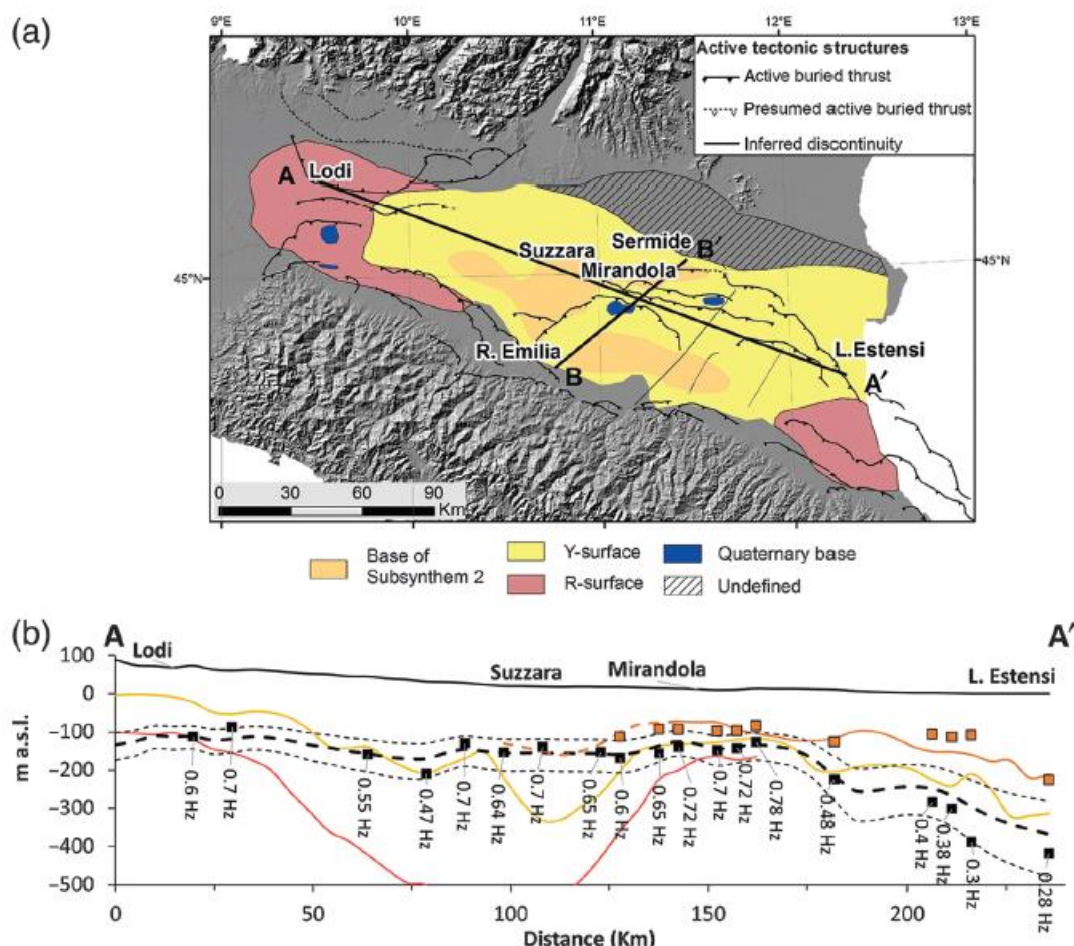


Figura 21 – (a) Carta delle discordanze stratigrafiche associate alla profondità del bedrock sismico;)b) Profilo A-A' (fino a 500 m sotto il livello del mare): le discontinuità stratigrafiche sono rappresentate dalle linee colorate mentre la profondità media del bedrock sismico è rappresentata dalla linea nera tratteggiata con i suoi intervalli di confidenza (95%) rappresentati dalle linee a punti neri. Fonte: Mascandola et al. (2019).

Un quadro litostratigrafico di maggior dettaglio ricavabile per il territorio comunale è derivabile dalla stratigrafia dell'unico pozzo per acqua che abbia raggiunto la profondità dell'interfaccia Qc/Qm e di cui si dispone, appunto, del profilo stratigrafico, all'interno della banca dati geognostica della Regione Emilia-Romagna. Il pozzo ha codice "184140P606" ed è stato realizzato nel 1983 in via dell'Industria nr. 6. La stratigrafia (Allegato 1 questa relazione) è:

Profondità (m)	Litologia
0,00 – 2,00	Terreno vegetale
2,00 – 18,00	Argilla compatta, bianca
18,00 – 40,00	Sabbia grossa
40,00 – 60,00	Argilla
60,00 – 80,00	Sabbia
80,00 – 102,00	Argilla

Profondità (m)	Litologia
102,00 – 112,00	Sabbia con acqua salata
112,00 – 170,00	Argilla

L'elevato numero di indagini penetrometriche eseguite sul territorio (principalmente CPT meccaniche, ma recentemente anche CPTu e SCPTu), unitamente ai sondaggi a carotaggio continuo eseguiti per il progetto della nuova Autostrada Regionale Cispadana (ARC), ha permesso di definire il dettaglio stratigrafico dei primi 10/20 m dal piano campagna in buona parte del territorio comunale.

Per le aree non indagate da indagini geognostiche, si è optato per una assunzione litostratigrafica che tiene conto sia della distribuzione delle litologie dei primi 2 m superficiali, sia della geomorfologia (entrambe note dal QC del PSC): in pratica, nelle aree in cui la combinazione tra litologia più superficiale e geomorfologia risulta simile a quella di aree indagate da indagini geognostiche, la litostratigrafia di quest'ultime è stata estrapolata anche alle prime.

In questo modo è stata realizzata la carta della **litostratigrafia di copertura** che mostra una sostanziale dominanza dei terreni fini, coerenti (argille organiche di media-alta plasticità, limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità), fatta eccezione della stretta fascia di direzione ONO-ESE a nord del Capoluogo – riconducibile al "dosso di Finale" (capitolo 4 e Figura 18) – e di alcune limitate zone sparse nel settore sud-orientale, caratterizzate prevalentemente da sabbie e miscele sabbiose. Per semplicità espositiva, si riporta in Figura 22 la versione su base topografica semplificata della carta, dove vengono messi in risalto con colori ben distinti le tre diverse litostratigrafie dominanti della coltre detritica di copertura.

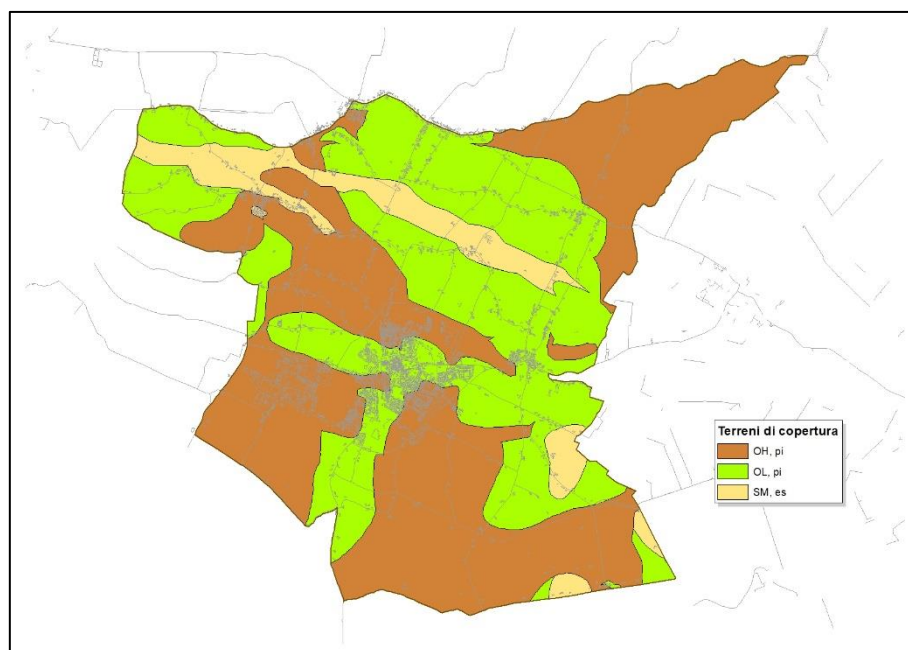


Figura 22 – Carta della litostratigrafia di copertura su base topografica semplificata.

La stessa fascia riconducibile al "dosso di Finale" è caratterizzata dalla presenza di sabbie e miscele sabbiose anche fino a 20 m di profondità da piano campagna (litozona 1, poligoni **gialli** in Figura 23), come risulta dalle indagini penetrometriche e dai sondaggi eseguiti per la ARC. Alternanze di miscele sabbiose e miscele limo-argillose (litozona 2, poligoni **verdi** in Figura 23) caratterizzano i primi 20 m dell'area del centro storico di San Felice e di fasce contigue verso est, verso ovest e verso sud, e di altre zone sparse nel settore settentrionale. Possono essere riconducibili a rami secondari del più ampio "dosso di Finale" (capitolo 4 e Figura 18).

Le rimanenti aree (litozona 3, poligoni **grigi** in Figura 23) sono caratterizzate dalla netta prevalenza di argille e limi, che vanno a colmare sostanzialmente le zone di “valle” tra le principali aree di dosso e paleoalveo.

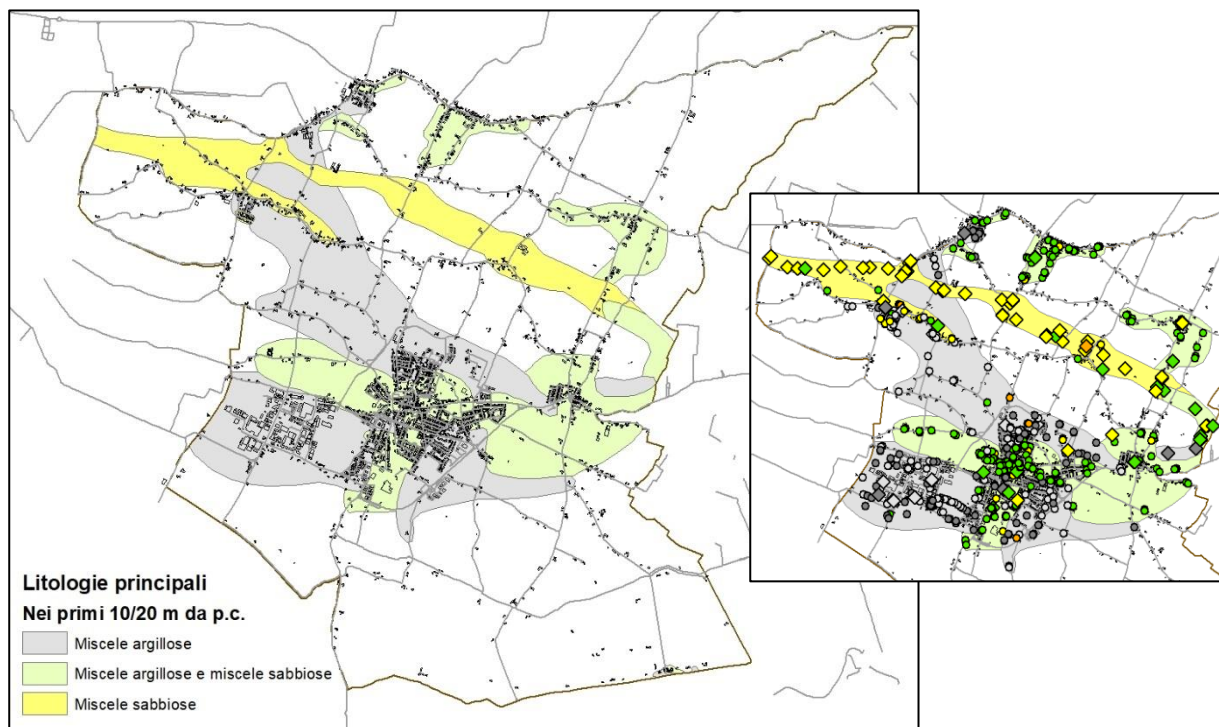


Figura 23 – Carta delle aree caratterizzate da litostratigrafia omogenea nei primi 10/20 m da p.c., ottenuta dall’esame dei sondaggi geognostici d’archivio. Nel riquadro a destra, ogni simbolo puntuale rappresenta un sondaggio geognostico d’archivio: penetrometrie statiche meccaniche (*cerchi*), penetrometrie statiche con piezocono e sondaggi a carotaggio continuo (*rombi*). **Colori simboli puntuali** – **giallo**: l’intero spessore indagato è composto da sabbie; **arancione**: prevalenza di argille nei primi 10 m, con livelli sabbiosi intercalati, mentre le sabbie occupano l’intero spessore compreso tra 10 e 20 m; **grigio scuro**: l’intero spessore indagato è composto da argille; **grigio chiaro**: lo spessore indagato è composto prevalentemente da argille, con livelli sabbiosi intercalati; **verde**: argille e sabbie hanno spessori cumulati simili, con le argille che generalmente compongono interamente i primi 10 m, senza alternanze sabbiose.

Le colonne stratigrafiche rappresentative delle tre zone omogenee dal punto di vista prettamente litostratigrafico (litozone) vengono descritte a seguire (Figura 24). Chiaramente, la sequenza litologica nei primi 10/20 m da piano campagna rappresenta una “media qualitativa” tra tutte le sequenze litologiche ricavate dall’analisi delle indagini geognostiche d’archivio. Per le profondità superiori, fino a raggiungere quella dell’ipotetico bedrock sismico, la sequenza litologica è assunta equivalente, per tutto il territorio, a quella sopra descritta per il pozzo per acqua, disponibile in Allegato 1 a questa relazione.

La litozona 1 vede la netta prevalenza dei terreni incoerenti (sabbie e miscele sabbiose): in alcuni casi i terreni incoerenti occupano l’intero spessore di 20 m, mentre nel maggior numero di casi i livelli più fini, coerenti, sono generalmente presenti all’interno dei primi 10 m. La litozona 2 vede una presenza pressoché simile, in percentuale, dei termini fini, coerenti, e dei termini grossolani, incoerenti, con i primi che più frequentemente sono presenti nei primi 10 m. La litozona 3 vede la netta prevalenza dei terreni fini, coerenti, intercalati da sottili spessori di sabbie e miscele sabbiose a profondità molto variabili.

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

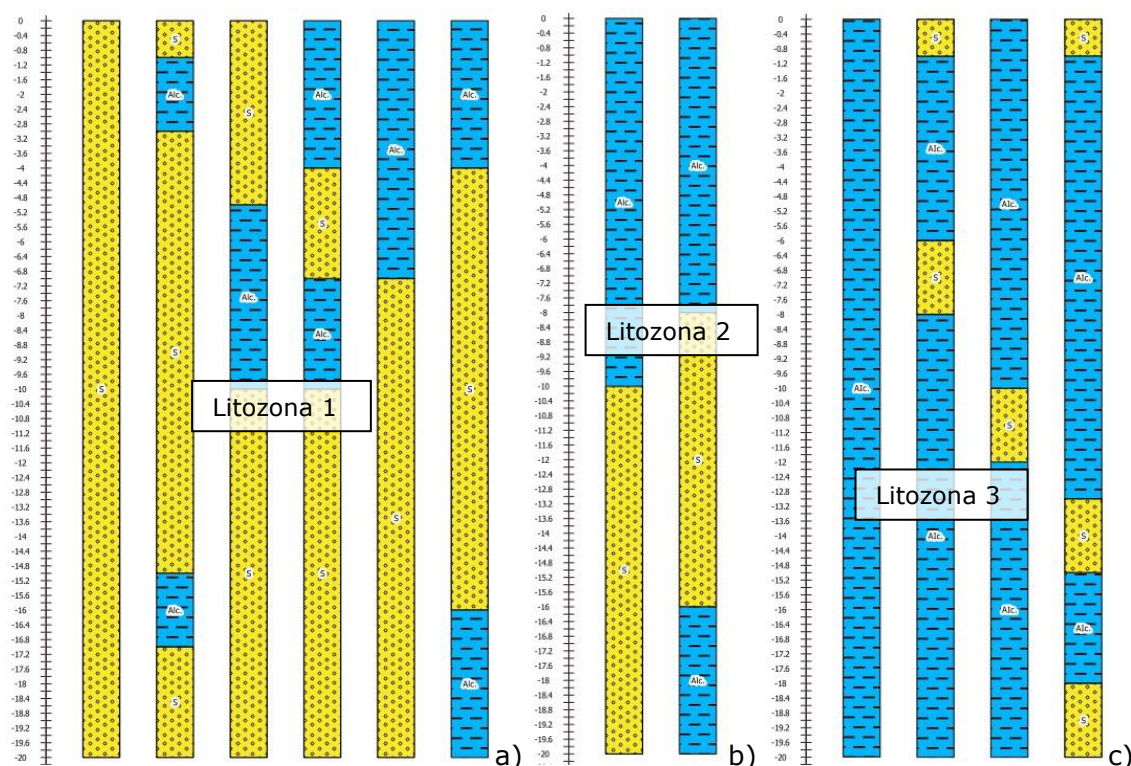


Figura 24 – Colonne stratigrafiche rappresentanti le sequenze litologiche più frequenti all'interno delle 3 litozone ricostruite dalle indagini penetrometriche d'archivio esaminate per questo studio; a) netta prevalenza di miscele sabbiose; b) miscele sabbiose e miscele argillose in percentuali di spessore cumulato simili; c) netta prevalenza di miscele argillose. Legenda – **S**: miscele sabbiose; **Alc.**: miscele argillose e limose generalmente consistenti.

Le stesse colonne stratigrafiche ora descritte andranno a comporre la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) che verrà descritta nel capitolo 9, completate da indicazioni sulle velocità delle onde "S" e sui possibili fenomeni di instabilità.

6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Sul territorio di San Felice sono state effettuate nel tempo numerose indagini sia di tipo geognostico che geofisico, quasi totalmente all'interno del perimetro del territorio urbanizzato. Prima degli eventi sismici del 2012 la quasi totalità delle indagini penetrometriche di tipo statico è stata effettuata con punta meccanica, raggiungendo profondità in media pari a 10 m, molto raramente superiori. Dopo il sisma, le indagini effettuate dalla Regione Emilia-Romagna per l'area del cratere sismico, quelle per il progetto di realizzazione della nuova Autostrada Regionale Cispadana e quelle per la ricostruzione post-sisma hanno visto un forte incremento nell'utilizzo del piezocono (a luoghi anche del cono sismico) e profondità d'indagine che hanno spesso raggiunto i 20 m e, in alcuni casi, anche i 30 m.

Le indagini geofisiche d'archivio sono in larga parte costituite da MASW, Re.Mi. e HVSR, mentre i cono sismici, Down-hole e Cross-hole sono stati eseguiti dalla Regione Emilia-Romagna a seguito degli eventi sismici per l'area del cratere.

Grazie alla cura, da parte dello scrivente, della parte "suolo-sottosuolo" del QC del PSC comunale e della microzonazione sismica comunale di II livello (nel rispetto della DAL RER 112/2007), il database delle indagini penetrometriche e geofisiche pre-sisma era già completato con la digitalizzazione di tutte le prove raccolte.

Il database è stato implementato con le indagini geognostiche e geofisiche utilizzate/eseuite dalla RER per le analisi di MZS dell'area del cratere sismico e rese disponibili per questo studio (in formato digitale modificabile) dal Servizio Geologico sismico e dei suoli della Regione.

Altre indagini sono state scaricate direttamente dal sito web del database geognostico regionale e digitalizzate per l'elaborazione, tra cui quelle eseguite per il progetto della nuova Autostrada Regionale Cispadana, nel settore settentrionale del territorio comunale.

Grazie alla collaborazione con l'Ufficio Tecnico del Comune di San Felice, sono state raccolte (in formato PDF) tutte le indagini eseguite per la ricostruzione post-sisma dall'anno 2012 all'anno 2017, per un totale di quasi 400 indagini, che hanno notevolmente arricchito il database, in particolare di penetrometrie a 20 m di profondità. La conversione in formato digitale modificabile di queste indagini ha senza dubbio richiesto un notevole sforzo, ma ha permesso di ricostruire, insieme alle prove pregresse, il modello estremamente dettagliato del primo sottosuolo del territorio di San Felice che è stato descritto nel precedente capitolo. Inoltre, i valori numerici delle prove hanno permesso di eseguire un numero statisticamente significativo di verifiche a liquefazione, sia sulle CPTu che sulle CPTm.

Indagini d'archivio raccolte per il QC del PSC:

- CPTm: 94.

Indagini eseguite per la MZS di II livello:

- CPTm: 16
- Re.Mi.: 12.

Sondaggi a carotaggio continuo da web-GIS RER: 17.

Indagini utilizzate/eseuite dalla RER per la MZS dell'area del cratere sismico 2012:

- Cross-hole: 3
- CPTm: 154
- CPTu: 40
- Down-hole: 6
- Cross-hole: 2
- ESAC_SPAC: 1
- HVSR: 11
- Pozzi per acqua: 11
- Sondaggi a carotaggio continuo: 19

- SCPTu: 7.

Indagini eseguite per la ricostruzione post-sisma:

- CPTm: 264
- CPTu: 9
- HVSR: 118
- MASW: 123.

CPTu integrative eseguite per questo studio: 4 a 20 m.

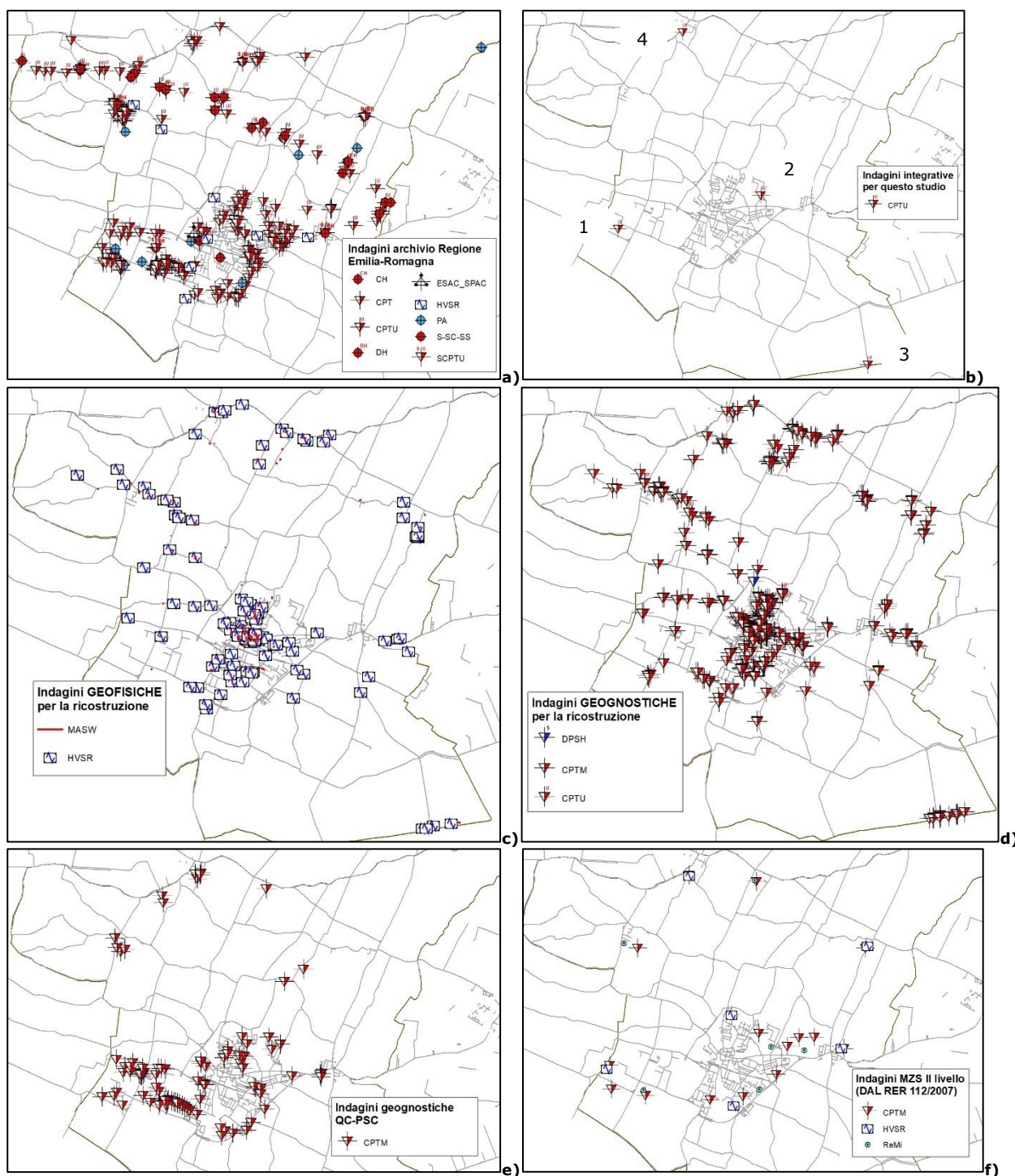


Figura 25 – Indagini geognostiche e geofisiche d’archivio eseguite all’interno del territorio di San Felice, digitalizzate per le analisi eseguite per questo studio di microzonazione di III livello.

Tutte le indagini sono state trasformate in formato digitale, georeferenziate, ed inserite in ambiente GIS. A tal proposito, sia i dati di base che i dati elaborati sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto delle indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'OPCM 4007/2012 e al Decreto del 16.03.2012 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile.

A seguire si riportano i soli risultati delle 4 CPTu integrative eseguite nel 2019 per completare la distribuzione delle indagini geognostiche in quelle aree del territorio urbanizzato e urbanizzabile non ancora indagate. Per i relativi certificati di prova si rimanda al fascicolo "Rapporti di prova" nella cartella "Plot\MS".

Le penetrometri statiche sono state eseguite utilizzando un penetrometro statico Pagani da 100 kN, con le seguenti caratteristiche tecniche:

Rif. Norme	ASTM D3441-86
Diametro Punta conica meccanica	35,7 mm
Angolo di apertura punta	60°
Area punta	10 cmq
Superficie manicotto	150 cmq
Passo letture	20 cm
Costante di trasformazione Ct	10

attrezzato con un piezocono Tecnopenta G1-CPL2IN con le seguenti caratteristiche:

Area di punta	10.00 cm ²
Diametro	35.70 mm
Area netta (AN)	6.60 cm ²
Superficie manicotto	150.00 cm ²
Lunghezza manicotto	133.70 mm
Area superiore manicotto (F sup.)	2.22 cm ²
Area inferiore manicotto (F inf.)	3.31 cm ²
Lunghezza totale piezocono	600.00 mm
Peso complessivo	3.00 Kg
Lunghezza raccordo punta – aste	250.00 mm

In Figura 26 viene riportato il modello stratigrafico-geotecnico della CPTu-1 eseguita in località "F.do La Buca", nel polo industriale comunale, in prossimità del confine con Medolla (Figura 25b).

L'indagine ha messo in evidenza la presenza di una copertura di circa 10 m di terreni fini, coerenti, mediamente consistenti, seguiti da uno spessore di circa 3 m di sabbie mediamente addensate. Oltre i 13 m sono a fondo prova, a circa 20 m, la sequenza stratigrafica è caratterizzata da argille di buona consistenza.

La seconda CPTu-2 è stata eseguita in località San Biagio/Mortizzuolo (Figura 25b). Il modello stratigrafico-geotecnico mostrato in Figura 27 mette in evidenza una copertura di 4 m di argille ed uno spessore di circa 3,5 m costituito da alternanze di miscele sabbiose mediamente addensate. Seguono terreni coerenti fino a 11 m dove ha inizio uno spessore di sabbie ben addensate che raggiunge i 20 m.

La terza CPTu è stata realizzata nella frazione di Dogaro (Figura 25b). Il modello stratigrafico-geotecnico mostrato in Figura 28 mostra una sequenza praticamente continua di argille di scarsa consistenza nei primi 10 m, seguite da altre argille di buona consistenza fino a 20 m. I primi 2 m superficiali sono invece costituiti da argille limose intercalate a sabbie limose.

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

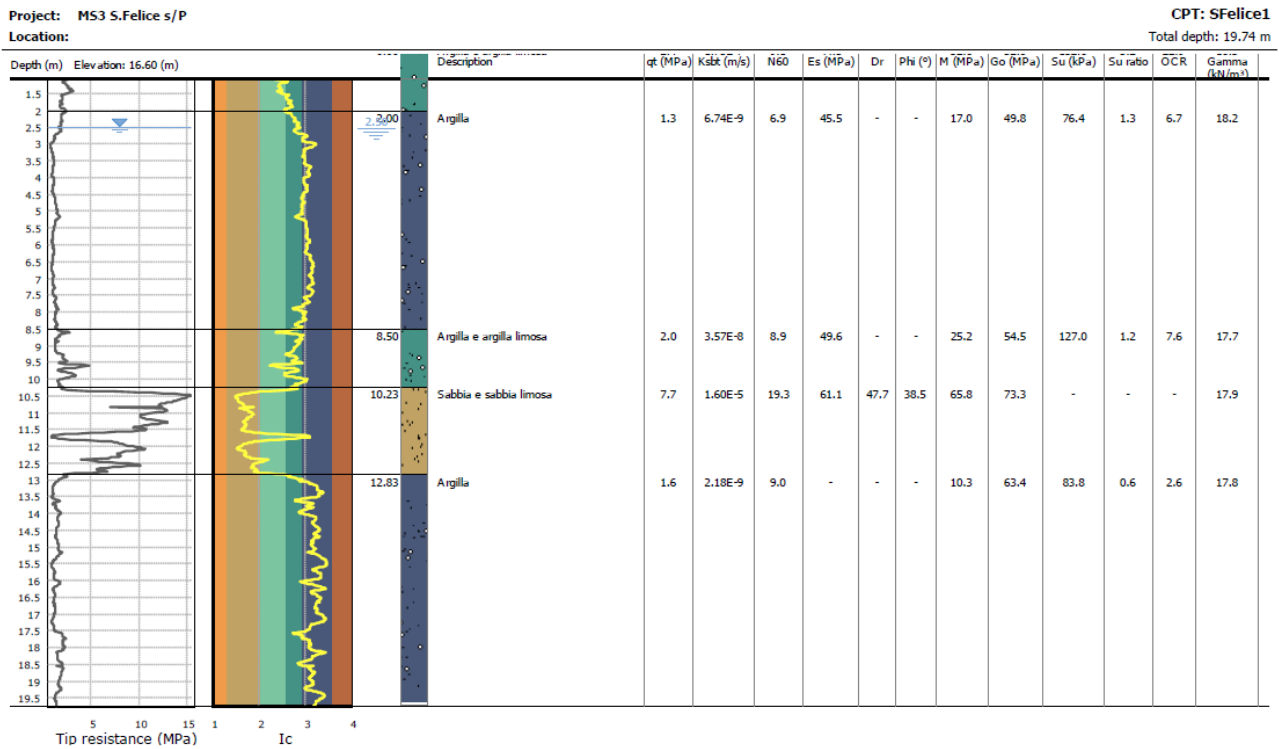


Figura 26 – Modello stratigrafico-geotecnico del terreno in corrispondenza della CPTu-1 eseguita in zona “Fondo La Buca” nel 2019 (Figura 25b), ad integrazione delle indagini geognostiche d’archivio.

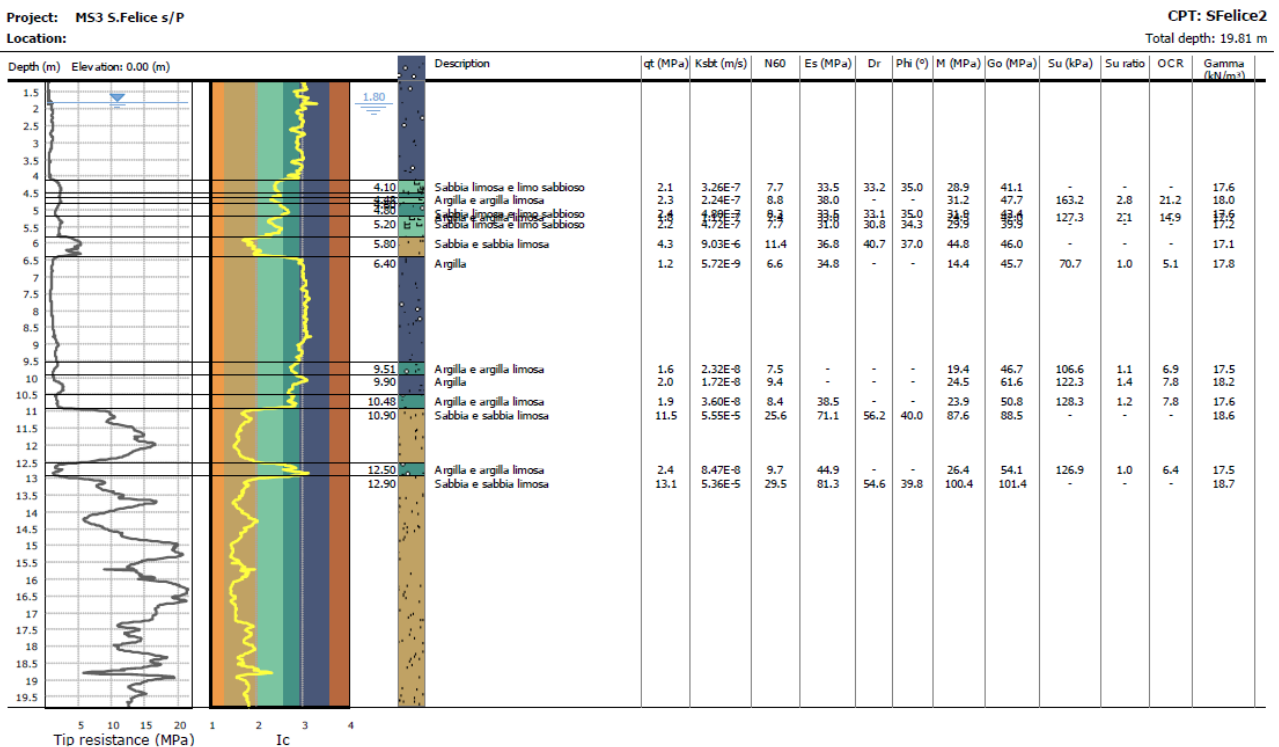


Figura 27 - Modello stratigrafico-geotecnico del terreno in corrispondenza della CPTu-2 eseguita in zona “San Biagio/Mortizzuolo” nel 2019 (Figura 24b), ad integrazione delle indagini geognostiche d’archivio.

La quarta CPTu è stata realizzata in località “C. Canalina Nuova”, nella prima periferia orientale del Capoluogo (Figura 25b). Il modello stratigrafico-geotecnico mostrato in Figura 29 evidenzia la presenza di una copertura di circa 10 m di terreni fini, coerenti, di buona consistenza, seguita da circa 2 m di miscele sabbiose mediamente addensate. Seguono argille di ottima

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

consistenza fino a 16 m. la sequenza prosegue fino a 20 m con alternanze di miscele sabbiose e miscele argillose, rispettivamente di ottimi addensamento e consistenza.

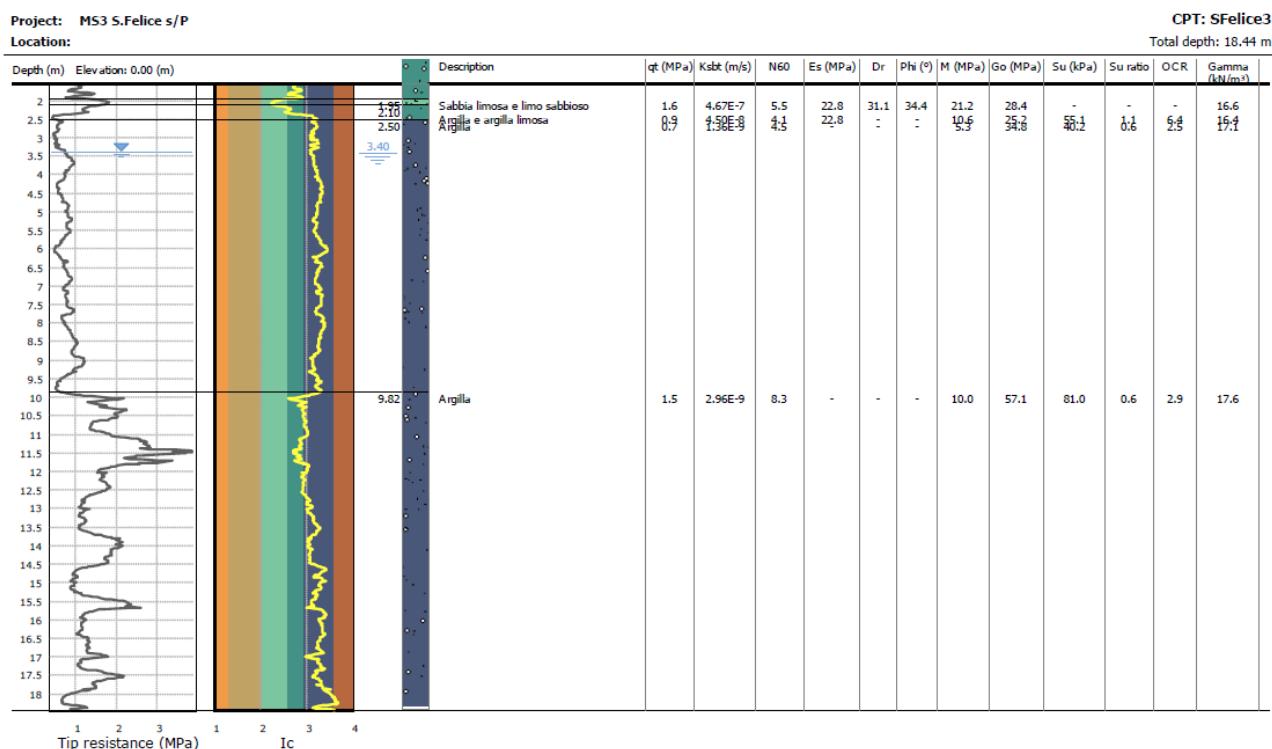


Figura 28 - Modello stratigrafico-geotecnico del terreno in corrispondenza della CPTu-3 eseguita in zona "Dogaro" nel 2019 (Figura 24b), ad integrazione delle indagini geognostiche d'archivio.

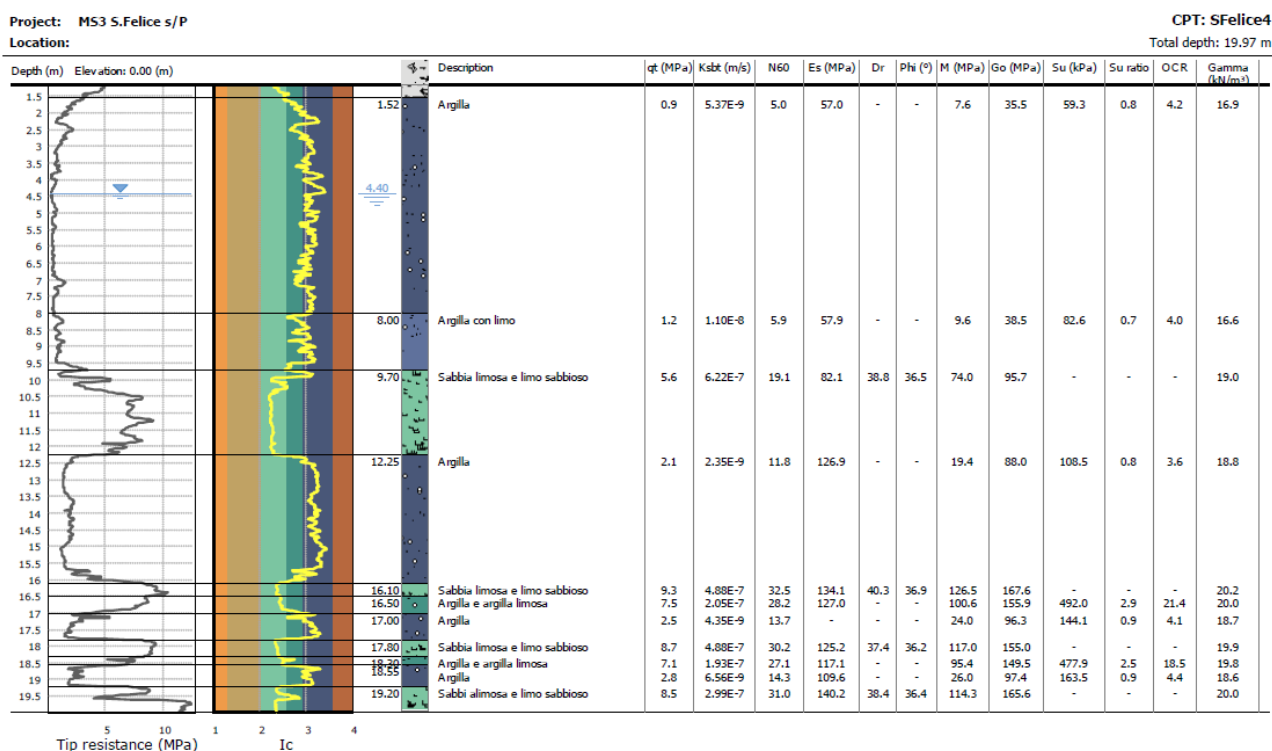


Figura 29 - Modello stratigrafico-geotecnico del terreno in corrispondenza della CPTu-4 eseguita in zona "C. Canalina Nuova" nel 2019 (Figura 24b), ad integrazione delle indagini geognostiche d'archivio.

7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Per quanto riguarda l'interpretazione dei dati ricavati dall'esecuzione delle 4 CPTu integrative del 2019 (Figura 25b), non vi sono da segnalare particolari incertezze: il piezocono non ha attraversato terreni particolarmente addensati nei primi metri superficiali in grado di desaturarne la punta, pertanto non è stato necessario ripetere le indagini.

Relativamente alle indagini penetrometriche d'archivio (CPTm, CPTu, SCPTu) utilizzate per questo studio, non si segnalano difficoltà interpretative: i dati originali sono sempre risultati di chiara lettura ed è stato possibile estrarne il valore numerico per successive re-interpretazioni e nuove elaborazioni.

Non vi sono incertezze per quanto riguarda l'interpretazione dei sondaggi a carotaggio continuo d'archivio poiché i relativi certificati di prova contengono sia l'interpretazione stratigrafica che le fotografie delle casse catalogatrici.

Anche per le indagini geofisiche d'archivio (MASW, Re.Mi., HVSR, Down-hole, Cross-hole e SCPTu) non si segnalano particolari dubbi interpretativi: per le indagini dirette (Down-hole, Cross-hole e SCPTu), dai certificati di prova è stato sempre possibile estrarre i valori numerici per le elaborazioni utili a questo studio, mentre per le indagini indirette si è fatto fede ai risultati interpretativi presenti negli certificati di prova allegati alle varie relazioni geologiche, rimandando ad esse per ulteriori approfondimenti relativi alle modalità di esecuzione delle prove.

8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Come già detto nel capitolo introduttivo di questa relazione, il Comune di San Felice possiede già uno studio di microzonazione sismica assimilabile ad un III livello di approfondimento nel senso dato dalla DGR 630/2019, ancorché non adeguato agli standard della DGR stessa e dei criteri della Commissione Tecnica nazionale per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica. La Variante 2014 al PSC in adeguamento al 1° stralcio del Piano della Ricostruzione contiene infatti una suddivisione del territorio comunale in aree a differente amplificazione litostratigrafica, unitamente all'individuazione di zone potenzialmente instabili per fenomeni di liquefazione ed il calcolo puntuale dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) in corrispondenza di numerose verticali penetrometriche.

Questo studio, oltre ad adeguare le analisi, i risultati e la loro rappresentazione ai criteri nazionali, ha notevolmente ampliato il database delle indagini geognostiche e geofisiche consentendo di raggiungere un dettaglio di analisi superiore rispetto ai precedenti studi.

Gli approfondimenti specifici per il III livello di analisi sono i seguenti:

- Nr. 20 analisi di risposta sismica locale monodimensionali, distribuite omogeneamente sul territorio di San Felice e in aree limitrofe;
- Calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) e dei cedimenti post-sismici in corrispondenza di tutte le verticali CPTu, SCPTu;
- Calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) in corrispondenza di tutte le verticali CPTm.

Nel presente capitolo verranno, pertanto, presentati le metodologie ed i risultati delle analisi di microzonazione sismica di III livello eseguite per le porzioni di territorio urbanizzato, urbanizzabile e per i principali assi infrastrutturali (presenti e di progetto) del territorio di San Felice, i cui dati di ingresso sono stati già ampiamente descritti nei capitoli precedenti, derivati da: indagini pregresse effettuate sul territorio e da nuove indagini appositamente eseguite per questo studio.

8.1. Analisi di risposta sismica locale

La disponibilità di indagini geognostiche e geofisiche effettuate dalla Regione Emilia-Romagna sul territorio comunale per approfondimenti sismici a seguito degli eventi del 2012 ha permesso di condurre analisi di risposta sismica locale in 12 punti all'interno del territorio di San Felice e in 8 punti nei territori limitrofi; questi ultimi sono stati introdotti per avere uno sguardo più ampio sulla distribuzione areale dei fattori di amplificazione.

I 20 punti (Figura 30) sono stati individuati in base ad un preciso criterio: la disponibilità di un sondaggio penetrometrico (CPTu o SCPTu) o a carotaggio continuo, ad almeno 20 m di profondità, affiancato ad un'indagine Down-hole/Cross-hole ed in prossimità di una misura di HVSR. Questo per poter avere una interpretazione sufficientemente attendibile della litostratigrafia ed una misura diretta della velocità delle onde sismiche "S" con la profondità nei primi 30 m.

L'estrapolazione dei valori di V_s da misure Down-hole/SCPTu a profondità superiori ai 30 m indagati dalle indagini geofisiche è stata effettuata tramite la relazione speditiva messa a punto da Albarello et al. (2011)⁴ e ripresa da Mascandola et al. (2019):

$$V_s(z) = V_0 \cdot (1+z)^x \quad (1)$$

⁴ Albarello, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., Pileggi, D., Puzzilli, L., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. *Boll. di Geofis. Teor. e Appl.* 52, 513–538.

che mette in relazione la V_s alla profondità (z) con il valore di V_s registrato nei primi metri superficiali (V_0), con la stessa profondità (z) e con il coefficiente "x", da variare fino ad ottenere il minimo scarto tra il profilo di V_s così calcolato e quello direttamente ricavato dall'indagine Down-hole. Ciò permette di estrapolare i valori di V_s ben oltre la profondità raggiunta dall'indagine geofisica, fino a raggiungere, al limite, il valore di 800 m/s (bedrock ingegneristico) o della principale superficie risonante (bedrock sismico) (Figura 31).

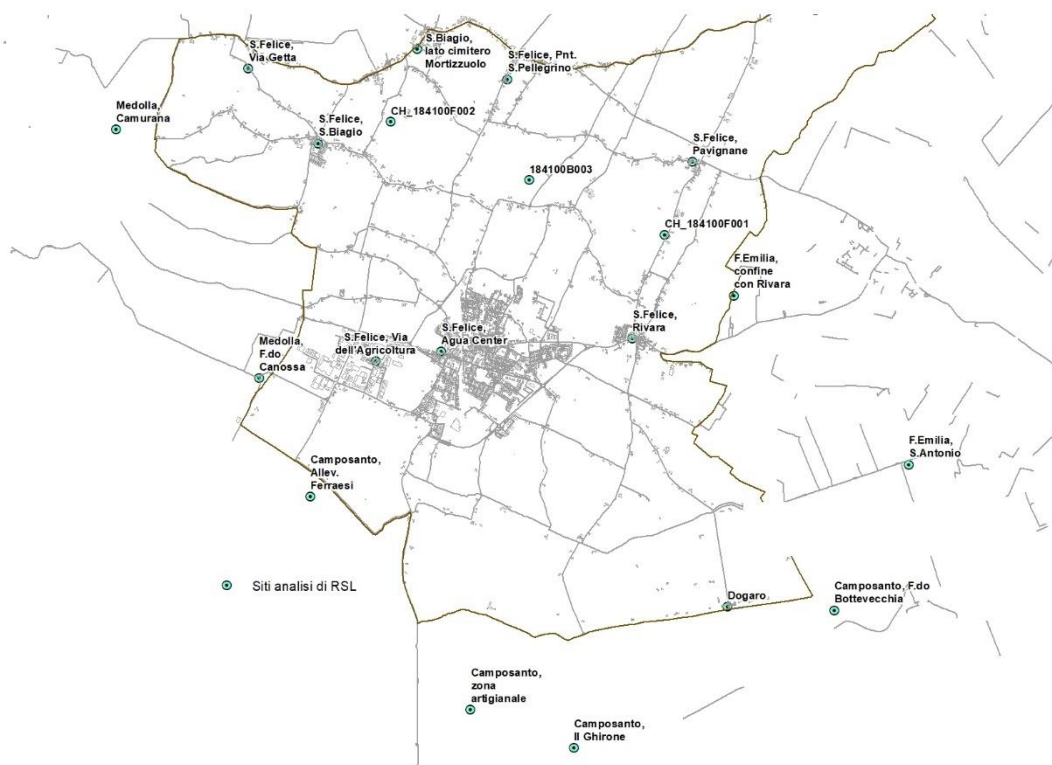


Figura 30 – Ubicazione dei 20 punti in cui sono state condotte le analisi di risposta sismica locale (RSL) per questo studio.

La disponibilità di misure di rumore ambientale da indagini HVSR, eseguite in prossimità delle coppie Down-hole/SCPTu, ha permesso di ipotizzare la profondità della principale superficie risonante, non necessariamente coincidente con l'interfaccia tra bedrock ingegneristico ($V_s \geq 800$ m/s, vedasi Mascandola et al., 2019) e terreni superficiali, come dimostrato da Petronio et al. (2018) (capitolo 5), bensì con il "bedrock sismico", ovvero un sensibile contrasto d'impedenza in cui le V_s si avvicinano o superano gli 800 m/s.

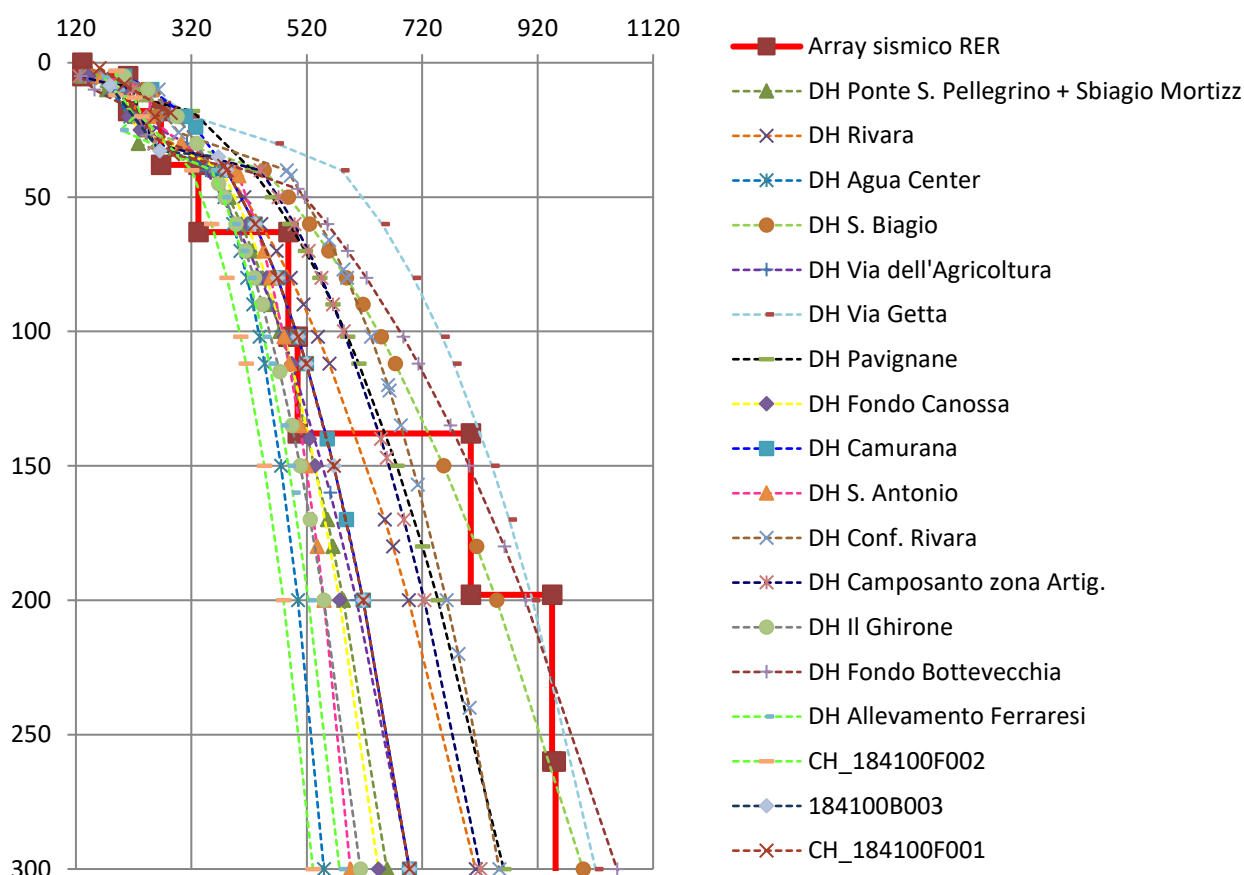


Figura 31 – Profilo di Vs con la profondità da array sismico eseguito dalla Regione Emilia-Romagna nel parco di Via Isonzo (linea rossa spessa, continua), confrontato con quelli estrapolati per ognuno dei 20 luoghi d’indagine dai valori di Vs misurati da DH/SCPTu tramite la relazione (1).

La profondità della principale interfaccia risonante (ovvero in corrispondenza della quale più ampio è il contrasto d’impedenza tra due spessori adiacenti in senso verticale) è stata ricavata, per ogni sito d’indagine, sempre attraverso il metodo di cui sopra, utilizzando l’equazione (2):

$$h \approx \left[\frac{V_0(1-x)}{4f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \quad (2)$$

dove f_r è la frequenza di vibrazione fondamentale del terreno, ricavata per le varie aree da indagini HVSr; la V_s , a tale profondità, è stata infine ottenuta con la formula (3):

$$\langle V_s \rangle \approx 4f_0 h \approx 4f_0 \left\{ \left[\frac{V_0(1-x)}{4f_0} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \right\} \quad (3)$$

dove f_0 è ancora la frequenza di vibrazione fondamentale del terreno.

La Tabella 1 riassume i risultati dell’applicazione del metodo di Albarello et al. (2011) nei 15 luoghi in cui verranno effettuate le analisi di risposta sismica locale.

Ubicazione	Codice Down-hole(F)/SCPTu(B) e profondità raggiunta	V ₀ (m/s)	f ₀ (Hz)	x	Profondità e velocità stimate del bedrock sismico
S.Felice, Pavignane	184110F003 14 m	180	1,2	0,35	144 m 690 m/s
S.Felice, Aqua Center	184140F003 30 m	210	0,8	0,21	150 m 500 m/s
S.Felice, Ponte S.Pellegrino	184100F003 30 m	170	0,84	0,3	170 m 570 m/s
S.Felice, Rivara	184150F006 26 m	150	1	0,38	170 m 680 m/s
S.Felice, S.Biagio	184100F004 30 m	170	1,3	0,4	154 m 800 m/s
S.Felice, Via dell'Agricoltura	184140F002 21 m	146	0,9	0,35	160 m 581 m/s
S.Felice, Via Getta	184100F001 30 m	287	1,4	0,28	154 m 866 m/s
Camposanto, All.Ferraresi	184140F001 25 m	193	0,8	0,24	157 m 500 m/s
Camposanto, F.do Bottevecchia	184150F003 26 m	180	0,7	0,4	150 m 800 m/s
Camposanto, Il Ghirone	202020F003 30 m	180	0,85	0,27	153 m 500 m/s
Camposanto, zona artigianale	202020F002 28 m	203	0,9	0,31	208 m 750 m/s
F.Emilia, confine con Rivara	184150B002 30 m	240	1,2	0,28	150 m 718 m/s
F.Emilia, S.Antonio	184150B001 30 m	238	0,7	0,2	198 m 554 m/s
Medolla, Camurana	184090B006 26 m	180	1	0,3	143 m 574 m/s
Medolla, F.do Canossa	184140B002 26 m	189	0,9	0,27	152 m 547 m/s
S.Biagio, lato cimitero Mortizzuolo	184100F003 30 m	170	0,84	0,3	170 m 570 m/s
CH_184100F002	184100F002 30 m	190	0,75	0,25	170 m 527 m/s
184100B003	184100B003 30 m	180	0,95	0,3	150 m 586 m/s
CH_184100F001	CH_184100F001 30 m	180	0,95	0,3	150 m 586 m/s
Dogaro	184150F003 26 m	180	0,7	0,4	150 m 800 m/s

Tabella 1 – Identificazione della **profondità** e della **velocità** del **bedrock sismico** nei luoghi selezionati per effettuare le analisi di risposta sismica locale per questo studio. V₀: velocità ponderata delle onde S nei metri superficiali indagati da DH/SCPTu; f₀: frequenza di vibrazione fondamentale del terreno da misure HVSr; x: parametro selezionato per la relazione di Albarello et al. (2011).

Come si vede da Tabella 1 e da Figura 32 (sinistra), la profondità della principale interfaccia risonante si attesta sui 150 m dal p.d.c. nella fascia centro-settentrionale del territorio, con direzione all'incirca O-E. Si approfondisce di 10/20 m procedendo sia verso nord che verso sud, trovando ulteriore approfondimento, fino a 200 m, nell'estrema fascia meridionale del territorio.

I valori più superficiali dell'interfaccia si trovano in direzione NO, avvicinandosi all'alto strutturale sepolto di Mirandola.

Sempre da Tabella 1 e da Figura 32 (destra), si vede come le velocità delle onde "S" all'interfaccia siano comprese tra 500 e 600 m/s nella maggior parte del territorio; si alzano a circa 700 m/s nel settore centro-orientale e raggiungono gli 800 m/s in due limitate zone nei settori nord-occidentale e meridionale.

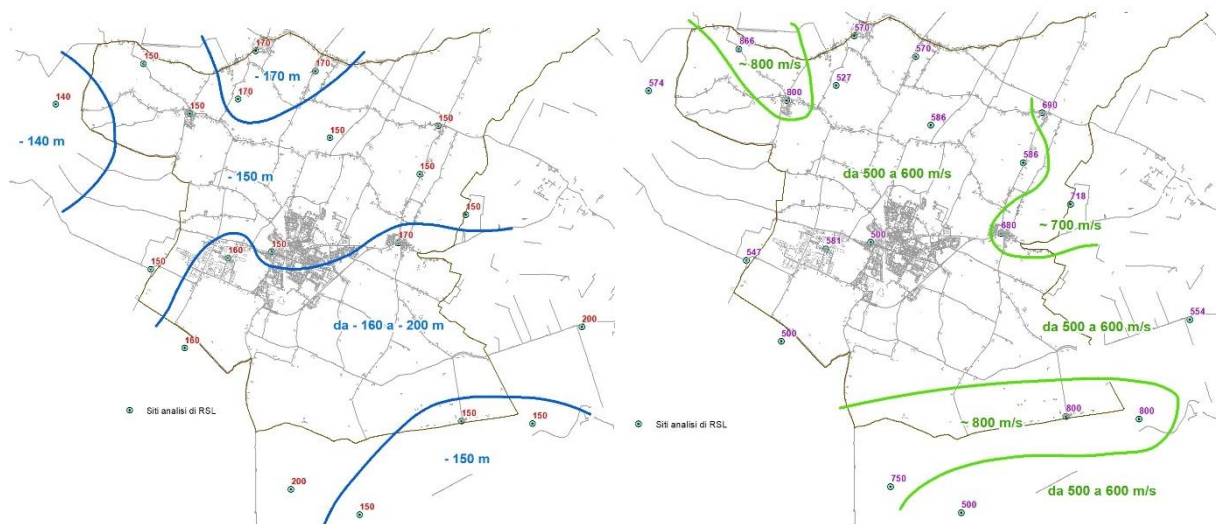


Figura 32 – Profondità del bedrock sismico (sinistra) e **valore di Vs del bedrock sismico** (destra) ricavate dall'utilizzo dei dati di Down-hole nei primi 20/30 m superficiali attraverso la relazione di Albarello et al. (2011). Vengono individuate con colori diversi le zone omogenee relativamente ai due valori presi in considerazione.

La valutazione del coefficiente di amplificazione litostratigrafico è stata condotta attraverso un'analisi di risposta sismica locale monodimensionale, lineare equivalente, nel dominio delle frequenze, utilizzando il codice di calcolo "STRATA"⁵, includendo l'effetto delle possibili incertezze sui dati di base e valutando:

- lo spettro di risposta elastico (al 5% di smorzamento) in superficie ed al bedrock sismico,
- i parametri dello spettro semplificato previsto dalla normativa che meglio si adatti allo spettro di risposta ottenuto dall'analisi numerica.

Un importante vantaggio legato a questo codice di calcolo è la possibilità che esso offre di gestire le significative incertezze presenti nei dati di modellazione (moto di riferimento, profilo di Vs, curve di smorzamento e riduzione del modulo di taglio) permettendo di fornire stime adeguatamente conservative degli spettri di scuotimento attesi.

Il moto di riferimento prescelto è costituito dalle componenti orizzontali di 7 accelerogrammi forniti dalla Regione Emilia-Romagna per l'intera regione⁶, moltiplicandone le accelerazioni normalizzate per il valore di accelerazione di riferimento più prossimo ad ogni sito considerato, pari a 0,147g, 0,146g e 0,153g, e considerando una vita nominale di 50 anni ed una classe d'uso II e lo stato limite SLV.

Le analisi di risposta sismica locale 1D hanno permesso di ricavare, per ognuna delle 20 aree:

- i profili di accelerazione dell'input sismico dal bedrock sismico alla superficie;
- i profili di massima deformazione dal bedrock sismico alla superficie;
- gli spettri elastici di risposta, in termini di pseudo-accelerazione al basamento sismico e alla superficie;
- l'amplificazione relativa ai valori di PGA e dell'Intensità di Housner nei periodi indicati dalla DGR 360/2019;
- gli accelerogrammi in superficie.

Per la caratterizzazione della sismo-stratigrafia, per ogni strato occorre determinare:

⁵ Kottke, A.R. & Rathje, E.M. (2008) – Technical Manual for Strata. PEER Report 2008, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 81 p.

⁶ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/sismica/indirizzi-per-studi-microzonazione-sismica>

- Il peso di volume γ in Kg/m³,
- La velocità delle onde s in m/s
- Le curve di decadimento dei materiali (G/G_0 e $D\%$)

Il peso di volume può essere ricavato direttamente dai dati del Down-Hole. Questa prova fornisce le V_s , le V_p , G_0 ed il coefficiente di Poisson. Da questi 3 parametri si possono ricavare, con note formule, i seguenti parametri:

- γ : da G_0 e V_s ,
- pressione litostatica: dal γ precedentemente ricavato.

Tutti i parametri geotecnici e geofisici da assegnare ad ogni strato necessari per la modellazione possono essere **estrapolati** fino alla profondità assunta del bedrock sismico tramite i seguenti passi:

- L'estrapolazione delle V_s al bedrock è, come visto, realizzata attraverso il metodo proposto da Albarello et al. (2011);
- Tramite i profili di velocità di V_s e V_p nei primi 30 m del Down-hole, è possibile ricavare l'equazione della relazione tra V_s e V_p e, quindi, estrapolare anche le velocità delle onde P fino al bedrock sismico;
- Di seguito, è possibile ricavare il profilo del coefficiente di Poisson fino al bedrock sismico utilizzando la formula che lo lega alle V_s ed alle V_p ;
- Dalla relazione matematica ricavabile tra G_0 e V_s nei primi 30 m si ricava, inoltre, l'estrapolazione di G_0 al bedrock sismico;
- L'estrapolazione di γ al bedrock sismico viene realizzata dalla formula che lega γ a G_0 ed alla V_s .

Per quanto riguarda le curve di decadimento, sono state utilizzate quelle da bibliografia, relative alle sabbie ed alle argille, già presenti all'interno del codice di calcolo, essendo queste le uniche due litologie dominanti in tutto il territorio comunale.

Per ogni sito d'indagine, la stratigrafia dei primi 20/30 m dal p.d.c. è stata ricavata dall'analisi delle indagini penetrometriche (SCPTu/CPTu) e/o dei sondaggi a carotaggio continuo. Oltre la profondità raggiunta dalle indagini, la stratigrafia è stata assunta identica a quella relativa al pozzo per acqua di 184140P606 (database geognostico Regione Emilia-Romagna, Allegato 1 a questa relazione), che ha raggiunto la profondità di 170 m, leggermente superiore a quella stimata del bedrock sismico. Questo poiché, come precedentemente spiegato, per il territorio comunale di San Felice non esistono sezioni geologiche profonde di dettaglio per quest'analisi e l'unica indagine geognostica reperibile in bibliografia, dotata di adeguata descrizione stratigrafica, è appunto il pozzo sopra citato, assunto pertanto come rappresentativo della stratigrafia comunale sino alla profondità d'interesse.

E' certamente questa una notevole approssimazione, che potrà essere ridotta in futuro qualora divenissero disponibili sondaggi geognostici che raggiungano la profondità del bedrock sismico.

Per ognuno dei 7 accelerogrammi di ingresso è stato indicato al codice di calcolo di eseguire 100 iterazioni facendo variare le V_s entro un intervallo di variazione che è minimo nei metri superficiali indagati dalle prove Down-hole e SCPTu e che viene reso progressivamente più ampio con l'aumentare della profondità. Non sono state invece variate né le proprietà dei materiali, né gli spessori degli strati. Le profondità del bedrock sismico sono state mantenute costanti, per ogni sito, ai singoli valori indicati in Tabella 1.

I risultati, in termini di fattori di amplificazione, si riportano a seguire (Figura 33) per la sola PGA, rimandando alle cartografie specifiche per tutti gli altri fattori d'amplificazione richiesti dalla DGR 630/2019.

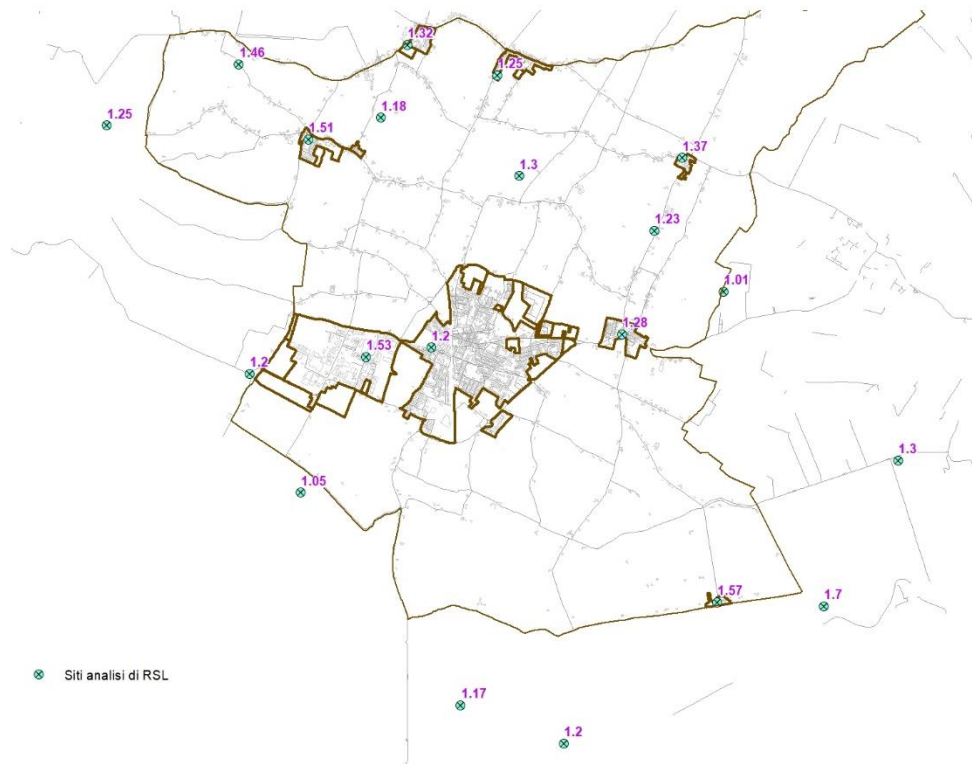
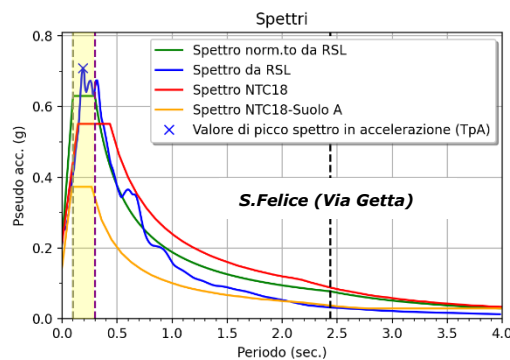
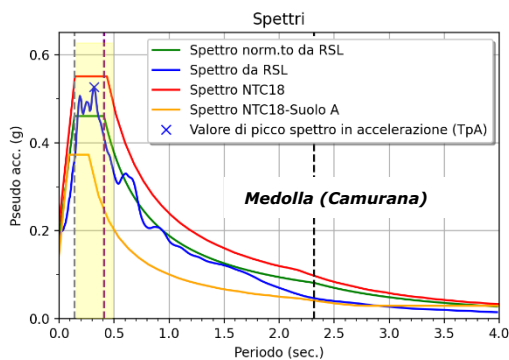
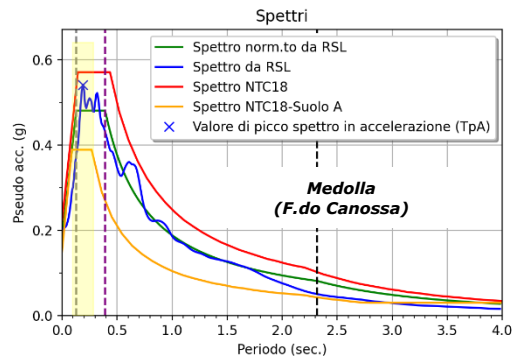
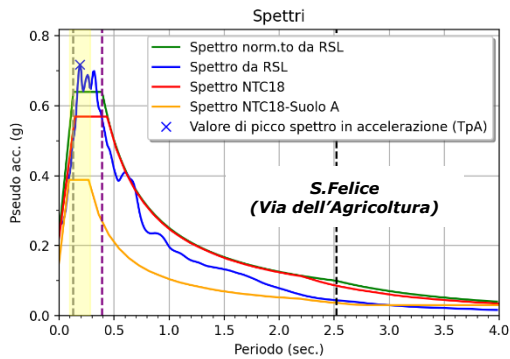
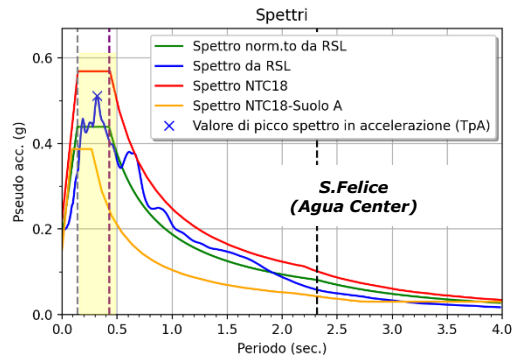
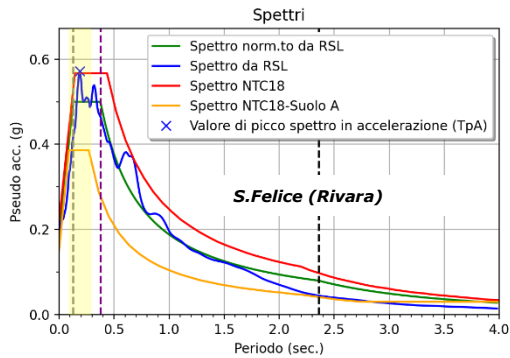
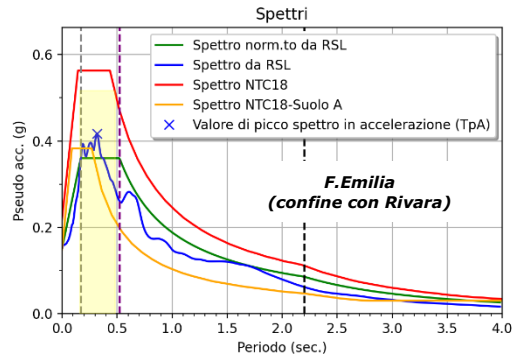
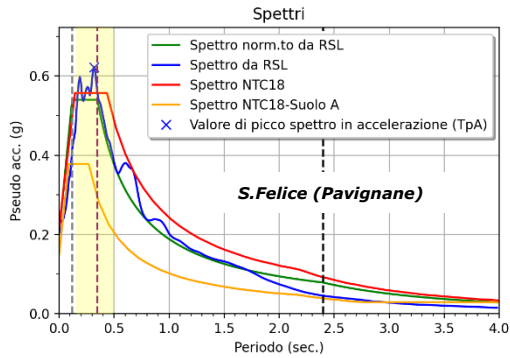
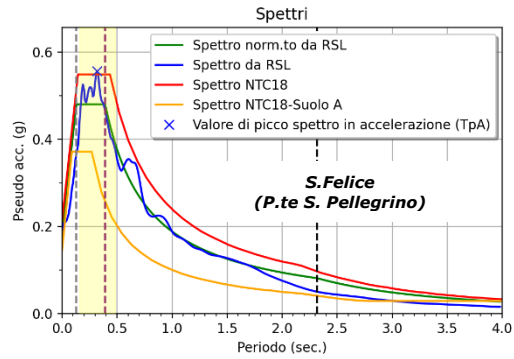
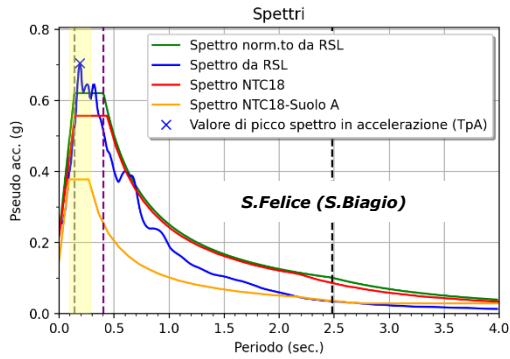


Figura 33 – Carta dei fattori d'amplificazione della PGA calcolati con analisi di risposta sismica locale in corrispondenza dei 20 punti prescelti.

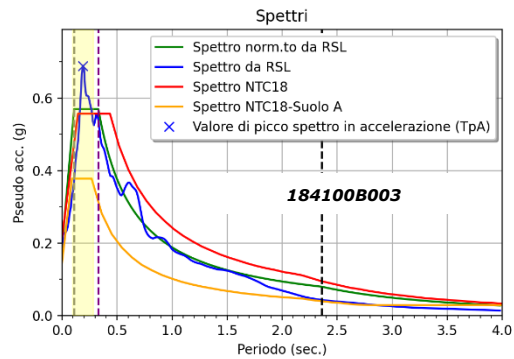
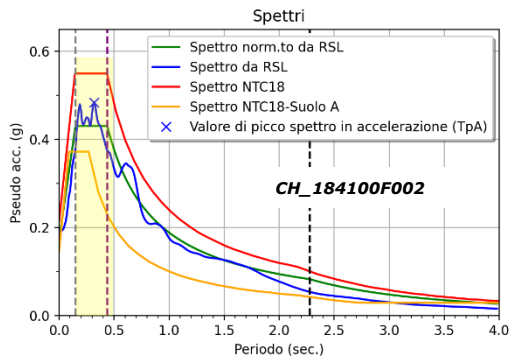
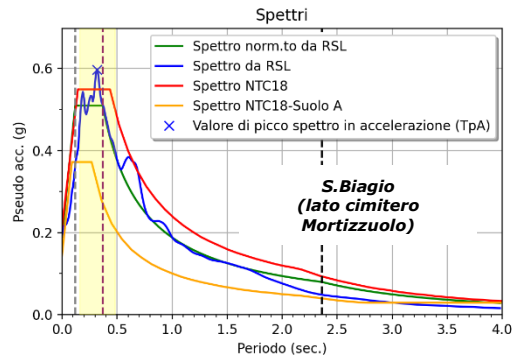
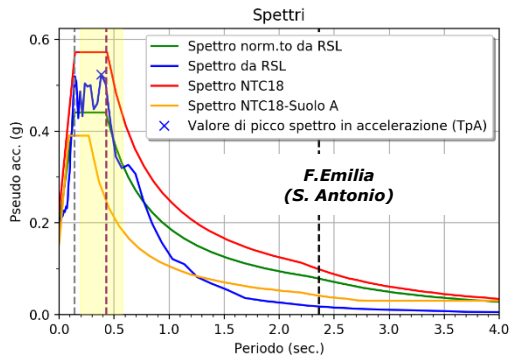
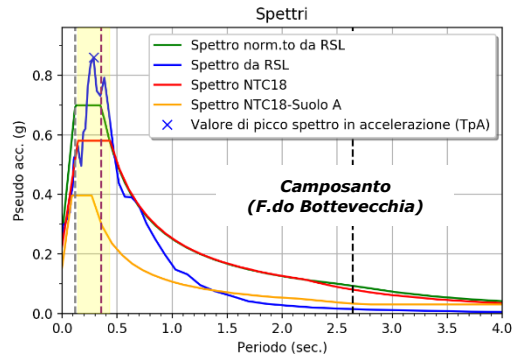
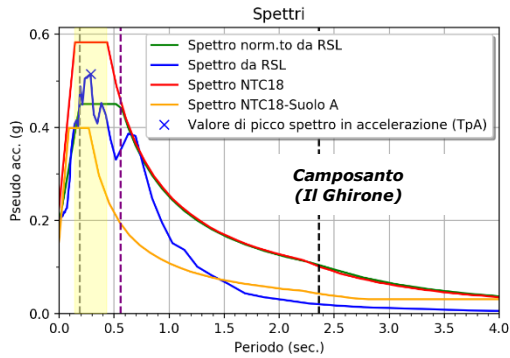
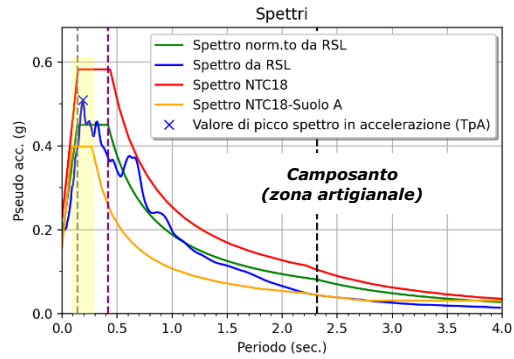
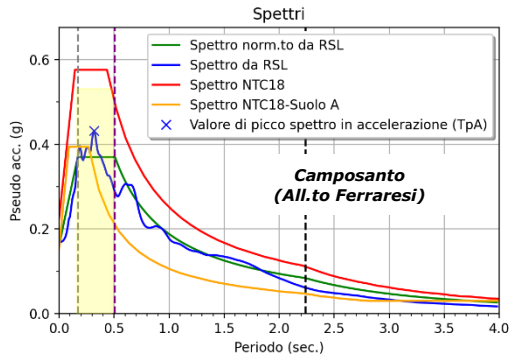
Se, infine, si mettono a confronto i risultati delle analisi di risposta sismica locale - in termini di spettri di risposta normalizzati - con gli spettri semplificati di Normativa per pari classe di suolo (Figura 34), si vede come le curve siano in 3 casi simili, con plateau ad accelerazione costante molto vicini (Figura 35). In 5 casi il plateau da RSL risulta più alto rispetto a quello di Normativa, mentre nei restanti 12 casi risulta inferiore.



COMUNE DI SAN FELICE S/P - PROVINCIA DI MODENA
MICROZONAZIONE SISMICA - 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
RELAZIONE ILLUSTRATIVA



COMUNE DI SAN FELICE S/P - PROVINCIA DI MODENA
MICROZONAZIONE SISMICA - 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
RELAZIONE ILLUSTRATIVA



COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

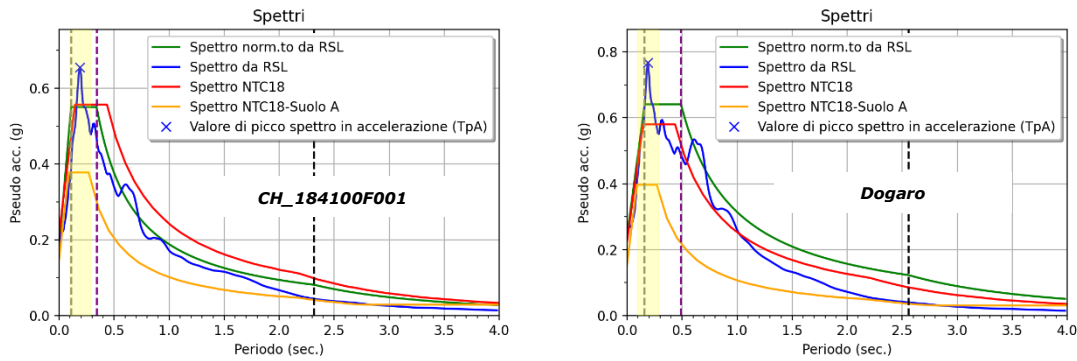


Figura 34 – Spettri di risposta in superficie da analisi di risposta sismica locale (blu: spettro medio; verde: normalizzato) per ognuno dei 20 siti esaminati. Per confronto: spettri di risposta da metodo semplificato NTC18 su suolo A e su suolo specifico.

SIMILI	CH_184100F001
	184100B003
	S.Felice (Pavignane)
RSL>NTC18	S.Felice (via Getta)
	S.Felice (S. Biagio)
	Camposanto (F.do Bottevecchia)
	S.Felice (via dell'Agricoltura)
	Dogaro
RSL<NTC18	F.Emilia (confine con Rivara)
	S.Felice (Rivara)
	S.Felice (Agua Center)
	Camposanto (All.to Ferraresi)
	Camposanto (zona artigianale)
	Camposanto (Il Ghirone)
	F.Emilia (S. Antonio)
	Medolla (Camurana)
	S.Felice (P.te S.Pellegrino)
	Medolla (F.do Canossa)
	S.Biagio (lato cimitero Mortizzuolo)
	CH_184100F002

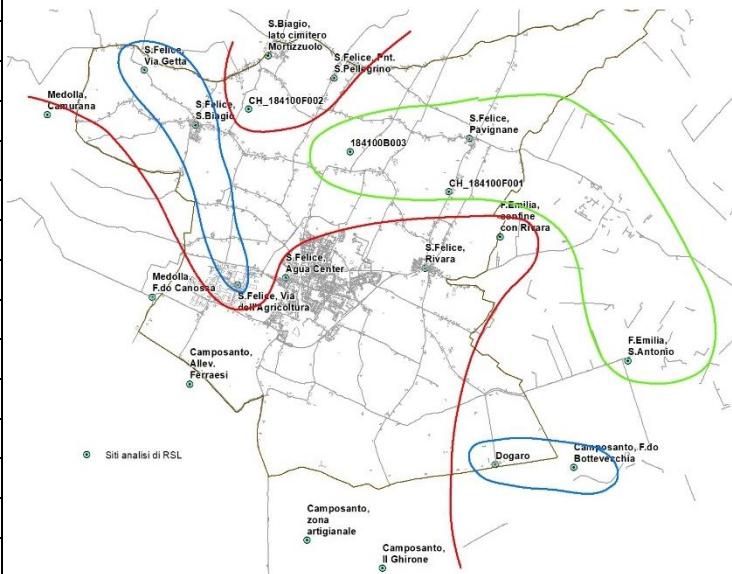


Figura 35 – Confronto tra altezze del plateau degli spettri da RSL, eseguite per questo studio, e quelle degli spettri di Normativa per suolo C. Rosso: zone in cui il plateau degli spettri da RSL risulta più basso di quello degli spettri semplificati NTC; Blu: zone in cui il plateau risulta più alto; Verde: zone in cui i plateau sono alla stessa altezza.

La disponibilità di numerose indagini penetrometriche a punta meccanica ha spinto ad eseguire il calcolo dell'IPL anche per queste prove, ma a puro scopo comparativo con i risultati ottenuti dalle CPTu/SCPTu.

L'approccio di calcolo è sempre quello di Boulanger & Idriss (2014) implementato, per le CPTm, all'interno di un codice di calcolo sviluppato dallo scrivente in linguaggio Python. Per un più corretto utilizzo delle CPTm per il calcolo dell'IPL sono state introdotte le correzioni dell'indice di comportamento del suolo (I_c) e della resistenza alla punta equivalente a sabbie pulite (q_{c1Ncs}) proposte da Facciorusso et al. (2016).

Il risultato dei calcoli eseguiti sulle 52 CPTu/SCPTu è visibile in Figura 37. Le verifiche a liquefazione sono contenute nella cartella "Plot\MS", sottocartella "Verifiche_liquefazione" (compresa in formato ".7z"): ogni verifica è contenuta in una apposita cartella identificata con un codice che permette di collocarla nello spazio tramite la mappa in Allegato 2 a questa relazione.

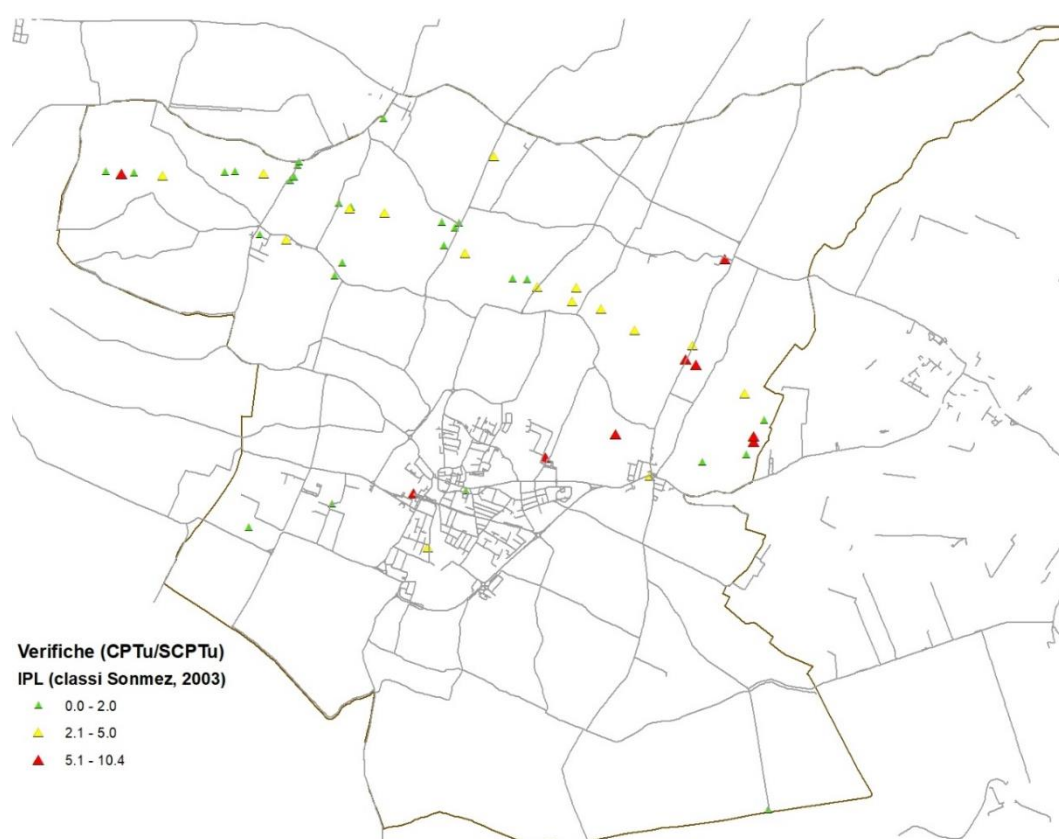


Figura 37 – Classificazione dei valori di IPL calcolati per questo studio in corrispondenza di 52 CPTu/SCPTu, in base alla suddivisione proposta da Sonmez (2003).

I valori relativamente più alti di IPL, compresi tra 5 e 10,4 (pericolosità alta), si addensano intorno al centro del Capoluogo e tra questo e la zona a nord di Rivara. Valori di moderata pericolosità, compresi tra 2 e 5, sono omogeneamente distribuiti lungo il tracciato di progetto della nuova Autostrada Regionale Cispadana.

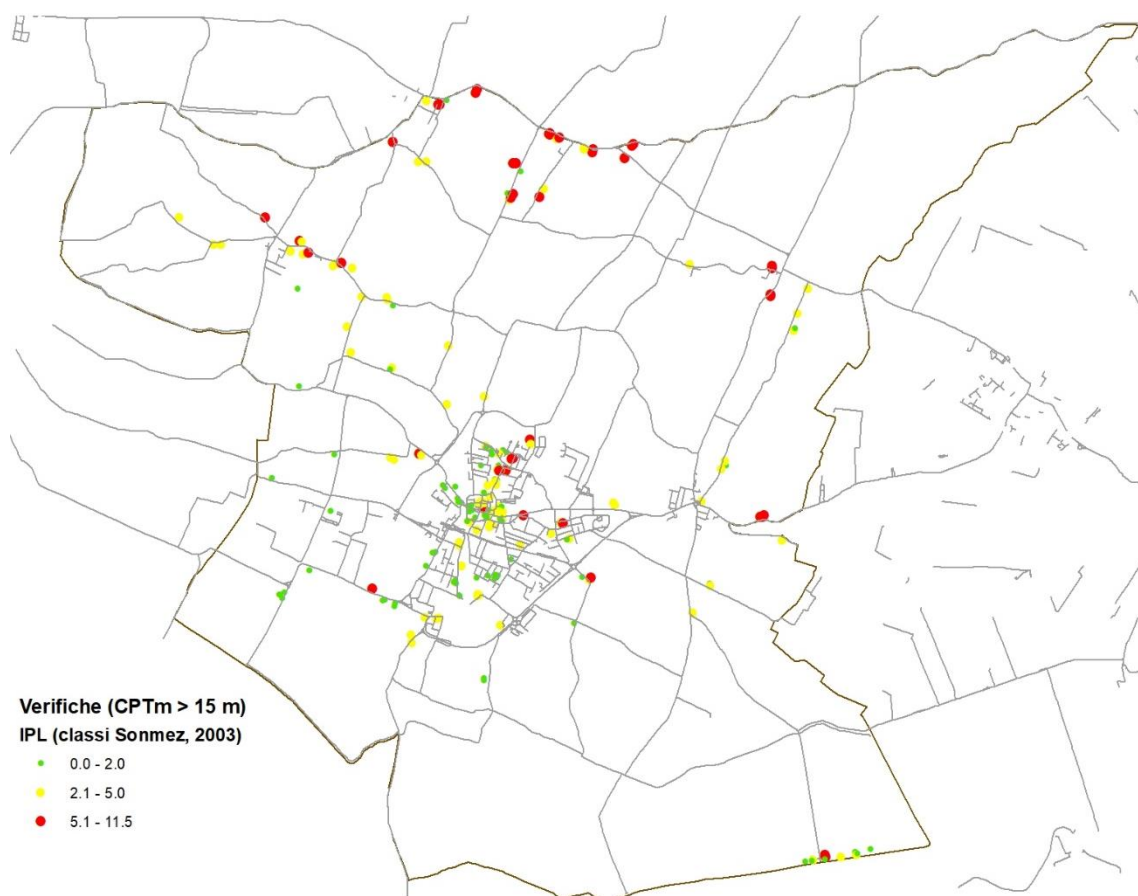


Figura 38 - Classificazione dei valori di IPL calcolati per questo studio in corrispondenza di 219 CPTm, in base alla suddivisione proposta da Sonmez (2003).

Guardando alla distribuzione degli IPL calcolati su 219 CPTm con profondità maggiori o uguali a 15 m (Figura 38) si vede come ancora vi sia un addensamento dei valori relativamente più alti di IPL, compresi tra 5 e 10,4 (pericolosità alta) nel centro del Capoluogo, ma anche nella fascia settentrionale del territorio comunale, presso Ponte di San Pellegrino, San Biagio e Pavignane. Anche i valori di moderata pericolosità, compresi tra 2 e 5, trovano maggior densità nel Capoluogo, ma anche nella fascia che congiunge quest'ultimo e San Biagio e presso Ponte di San Pellegrino, Pavignane, Rivara e Dogaro.

La quasi totalità delle manifestazioni del fenomeno della liquefazione rilevate a seguito degli eventi sismici del 2012 (Figura 39) si collocano laddove più rarefatte sono le indagini penetrometriche d'archivio. Nonostante ciò, è possibile vedere come tali manifestazioni abbiano avuto luogo in un settore dove la maggior parte delle verifiche su CPTm hanno restituito una pericolosità moderata.

Se si osserva Figura 40 (sinistra, ovvero la carta della litologia del primo metro superficiale), appare da subito evidente come la maggior parte degli IPL di alta pericolosità ricadano in corrispondenza di litologie fini (miscelate argillose), da cui è possibile dedurre che i livelli potenzialmente liquefacibili non siano superficiali. Anche le manifestazioni del fenomeno rilevate nel 2012 ricadono in un'area dominata in superficie dalle argille.

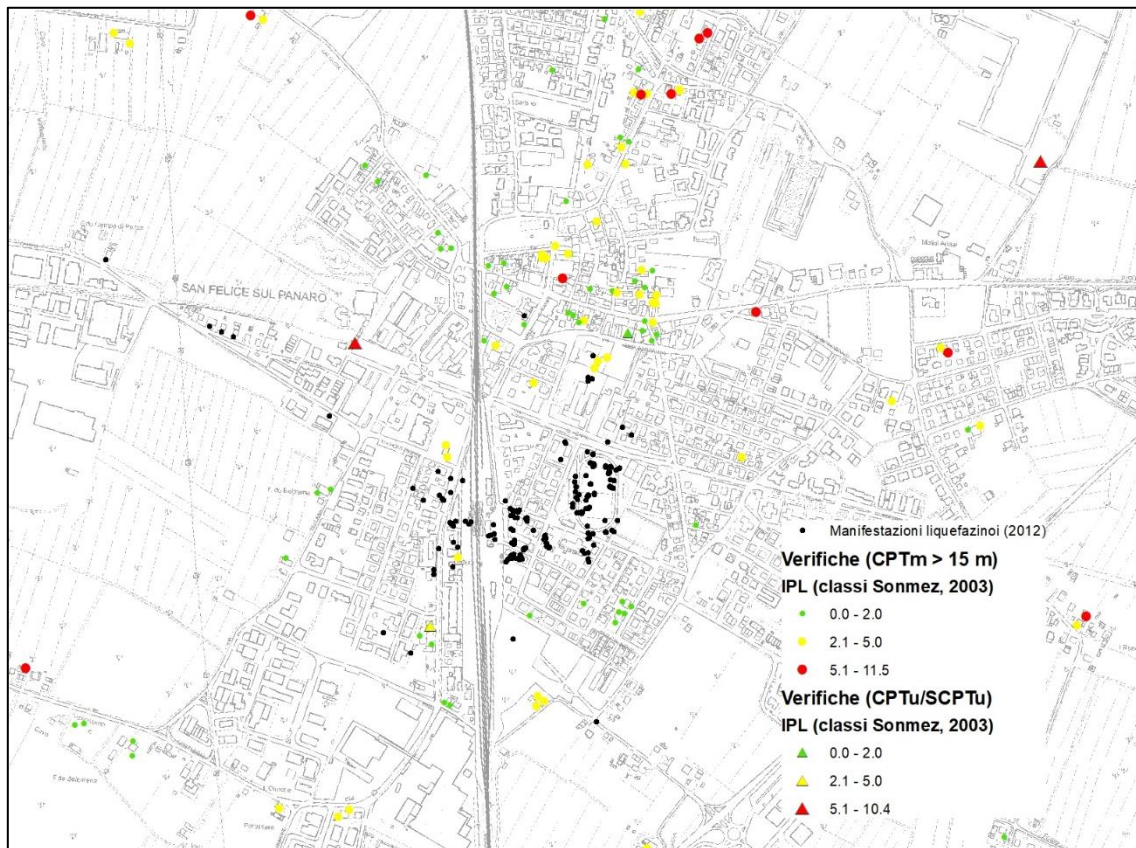


Figura 39 – Classi di IPL da verifiche su CPTu/SCPTu e CPTm eseguite per questo studio, confrontate con le manifestazioni del fenomeno della liquefazione rilevate a seguito degli eventi sismici del 2012.

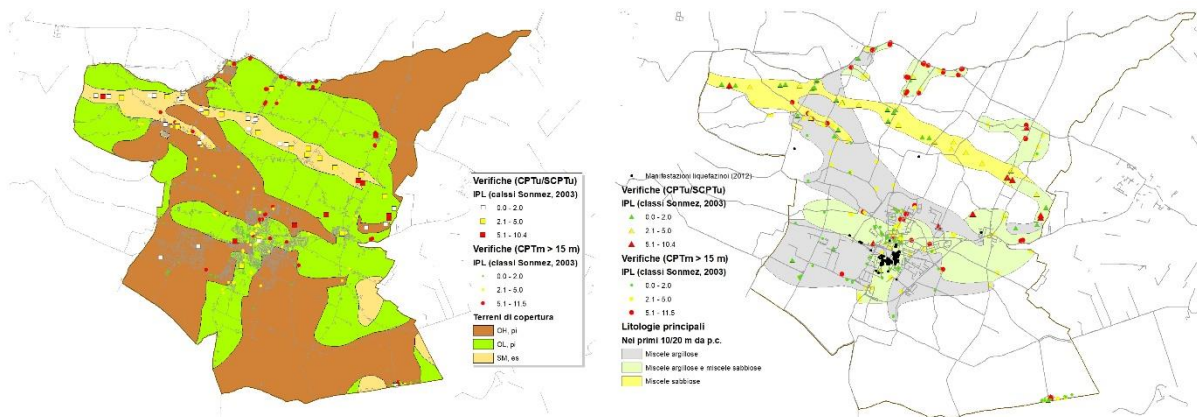


Figura 40 – Sinistra: sovrapposizione dei punti di verifica dell'IPL (totali) e la litologia del primo metro superficiale. Destra: sovrapposizione dei punti di verifica dell'IPL (totali) e la litologia prevalente nei primi 10/20 m indagati dalle prove penetrometriche.

Se invece si confrontano gli IPL con le litologie dominanti nei primi 10/20 m (Figura 40, destra), allora diviene chiaro come gli IPL più alti ricadano più frequentemente nelle aree dove miscele sabbiose ed argillose si alternano lungo lo spessore indagato. Le stesse manifestazioni del fenomeno rilevate nel 2012 ricadono in queste aree.

Interessante è, infine, esaminare quali sono gli intervalli di profondità dove con maggior frequenza si collocano i livelli suscettibili di liquefazione (Figura 41). Laddove l'intera stratigrafia è dominata da miscele sabbiose (come in corrispondenza del dosso di Finale) o da alternanze tra miscele sabbiose e miscele argillose, i livelli potenzialmente liquefacibili sono presenti lungo l'intero spessore indagato o nei 10 m più profondi (da 10 a 20 m).

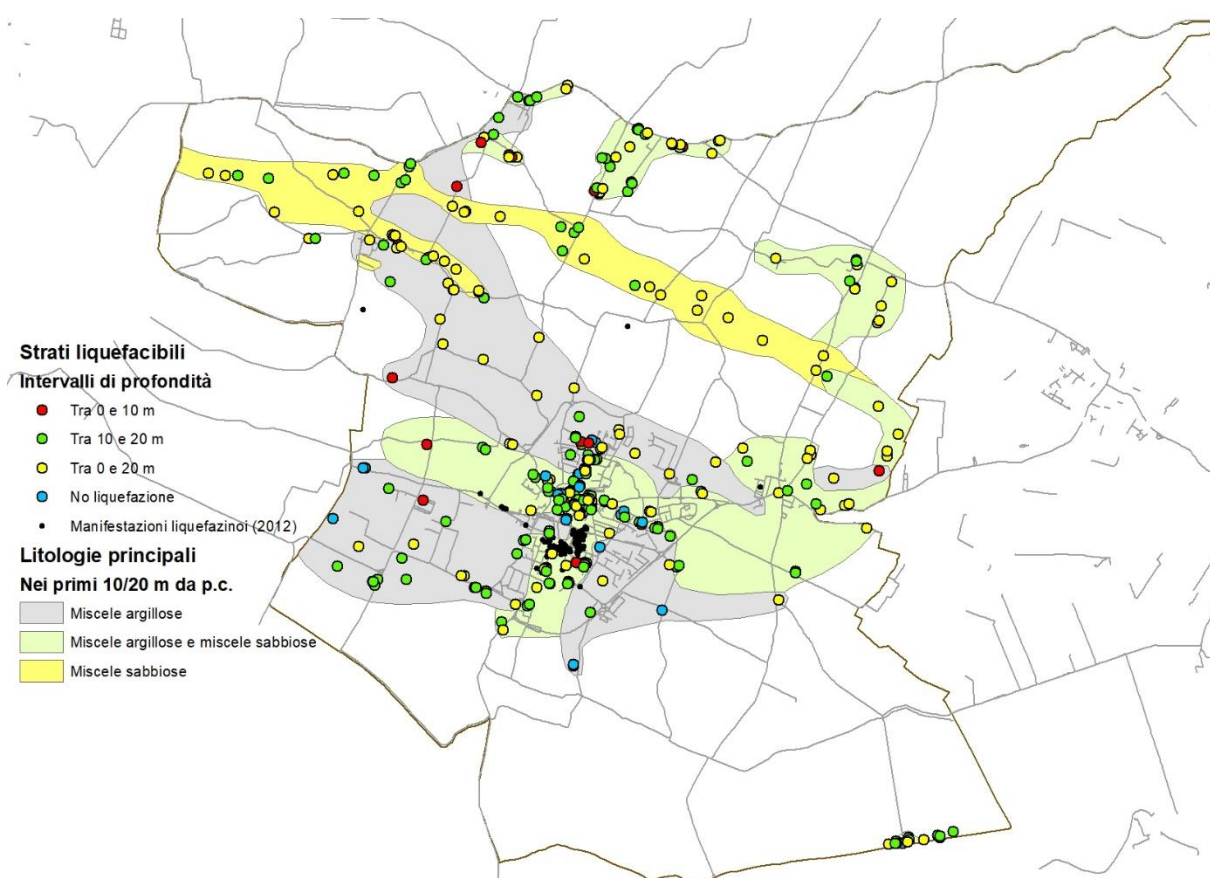


Figura 41 – Intervalli di profondità in cui sono presenti livelli potenzialmente liquefacibili.

Pochi sono i punti in cui i livelli potenzialmente liquefacibili sono solo nei primi 10 m, così come anche quelli in cui non vi sono livelli liquefacibili.

Per l'individuazione di zone omogenee dal punto di vista dell'IPL sono stati utilizzati soltanto i risultati delle verifiche eseguite in corrispondenza delle **CPTu/SCPTu**. Laddove la densità di prove risultava molto rarefatta, per tracciare i contorni delle zone omogenee sono stati considerati anche i risultati delle verifiche eseguite sulle CPTm, ma soltanto in modo qualitativo, ovvero: la classe di IPL assegnata ad ogni zona omogenea è stata eseguita considerando i soli valori singoli di IPL calcolati sulle CPTu/SCPTu.

Il risultato della zonizzazione è visibile in Figura 42. Le aree interessate dalla zonizzazione sono solo quelle del territorio urbanizzato/urbanizzabile, a cui sono stati aggiunti il tracciato di progetto della nuova Autostrada Regionale Cispadana e il tracciato della ferrovia (con ampio margine laterale). Come si può vedere, seguendo gli Standard di rappresentazione nazionali, è stata eliminata la classe con $IPL \leq 2$.

Il criterio principale che ha guidato la suddivisione è quello della frequenza: la maggiore frequenza di manifestazione di una classe di pericolosità all'interno di un'area ha determinato l'assegnazione dell'intera area a quella classe. E' questo il caso, ad esempio, del centro del Capoluogo (Figura 43): qui, la presenza di due verticali penetrometriche con $IPL > 5$ ed una sola con $IPL < 5$ ha determinato l'assegnazione alla classe " $5 < IPL \leq 15$ "; assegnazione supportata anche dalla presenza di diverse CPTm con $IPL > 5$ e dall'effettiva manifestazione di fenomeni di liquefazione in occasione degli eventi del 2012.

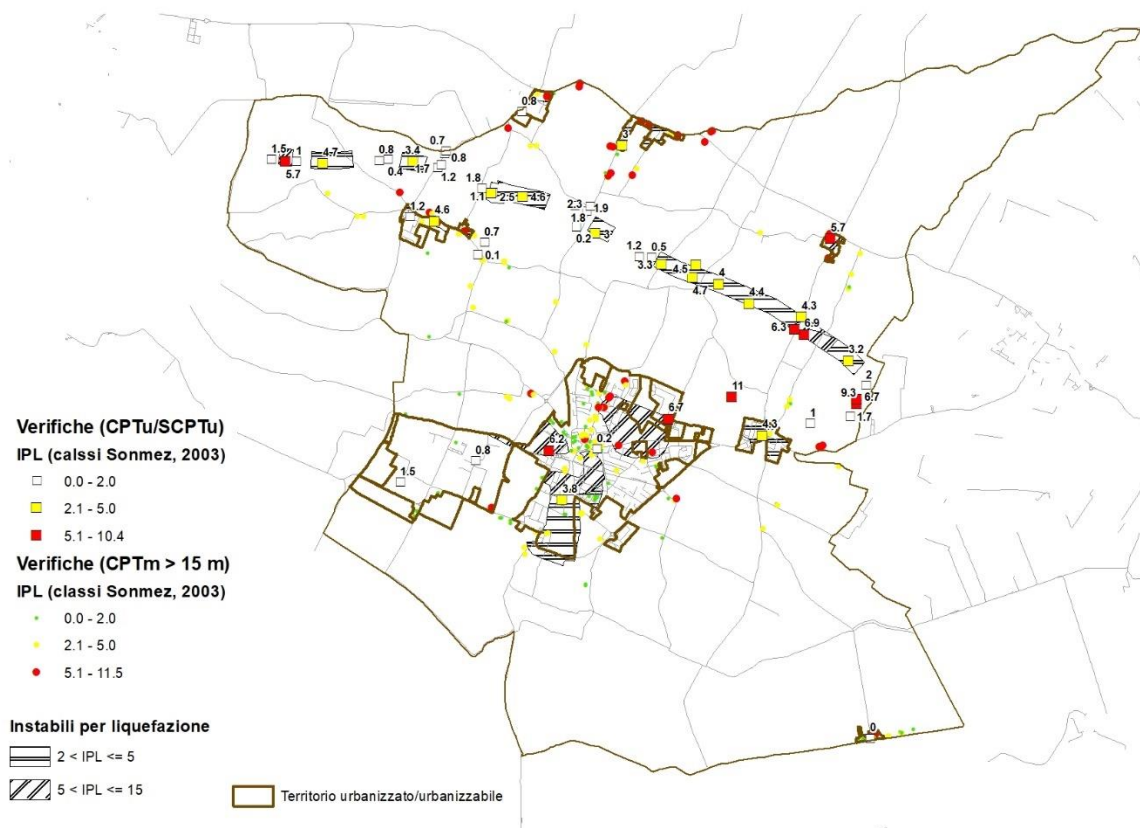


Figura 42 – Zonizzazione delle aree potenzialmente liquefacibili sulla base delle verifiche eseguite sulle verticali CPTu/SCPTu. La zonizzazione è stata eseguita all'interno del territorio urbanizzato/urbanizzabile. Come da Standard di rappresentazione, le zone con $IPL \leq 2$ non vengono evidenziate.

Sempre nel centro del Capoluogo (Figura 43), nelle fasce esterne, meridionale ed orientale, l'assenza di indagini CPTu/SCPTu ha costretto ad utilizzare i risultati delle sole CPTm, anche qui utilizzando il criterio della frequenza.

In sintesi, le aree con pericolosità maggiore ($5 < IPL \leq 15$) sono:

- Il centro del Capoluogo,
- Una piccola porzione di San Biagio (est di Mortizzuolo),
- Una stretta fascia a sud della SP8, presso Ponte di San Pellegrino,
- L'intero territorio urbanizzato di Pavignane,
- Località "Corte Bassa - Il Palazzo", lungo via Grande.

Tutte le restanti sono a pericolosità inferiore ($IPL < 5$).

Il confronto, solo per la zona del centro del Capoluogo (Figura 44), tra le verifiche a liquefazione eseguite per questo studio e quelle eseguite dalla Regione Emilia-Romagna per la Microzonazione sismica del PSC 2014, evidenzia diversi elementi simili. La zona nord del Capoluogo vede in entrambe le carte la presenza di diversi valori di IPL tra 5 e 15 (poligono rosso in Figura 44; alcuni valori puntuali di IPL (cerchi blu) sono molto vicini. La maggior differenza tra le due carte è data dal numero di prove esaminate nel centro storico del Capoluogo: grazie, infatti, alla disponibilità di numerose indagini relative alla ricostruzione post-sisma, per questo studio sono stati calcolati gli IPL anche per quest'area, nonostante la quasi totalità delle penetrometrie fosse ancora a punta meccanica.

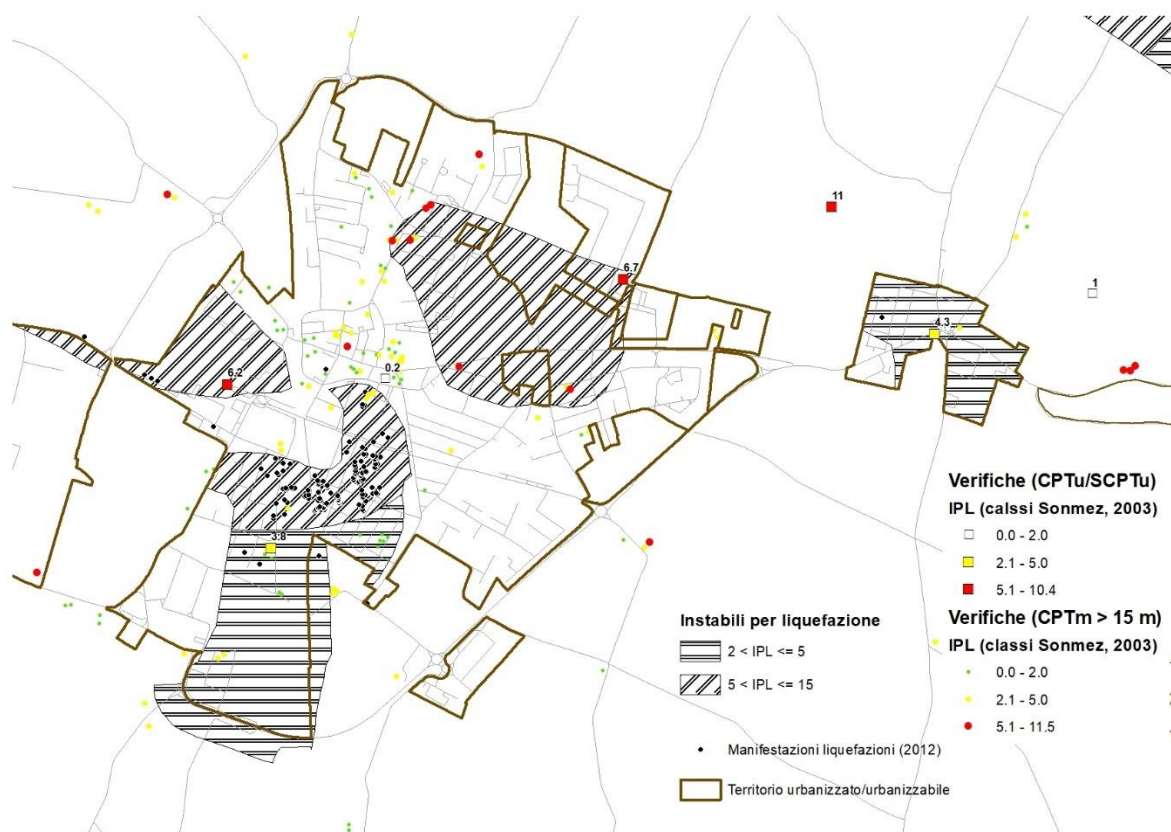


Figura 43 - Zonizzazione delle aree potenzialmente liquefacibili sulla base delle verifiche eseguite sulle verticali CPTu/SCPTu: **zoom** sul centro del Capoluogo. La zonizzazione è stata eseguita all'interno del territorio urbanizzato/urbanizzabile. Come da Standard di rappresentazione, le zone con $IPL \leq 2$ non vengono evidenziate.

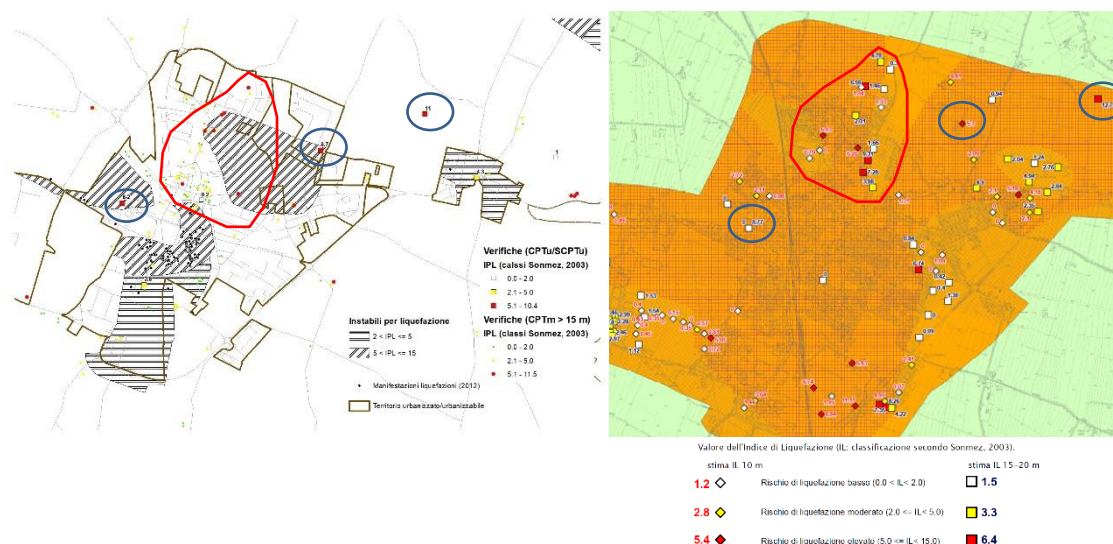


Figura 44 – Centro Capoluogo: confronto tra i risultati delle verifiche puntuali a liquefazione eseguite per questo studio (sinistra) ed i risultati delle verifiche puntuali a liquefazione eseguite dalla Regione Emilia-Romagna per la Microzonazione sismica del PSC 2014 (Tavola PSC/T3). A differenza della carta di destra, quella di sinistra non riporta le verifiche eseguite sulle verticali penetrometriche che hanno indagato spessori inferiori ai 15 m.

L'introduzione delle correzioni di Facciorusso et al. (2016) all'interno dell'algoritmo di calcolo di Boulanger & Idriss (2014) ha comunque permesso di stimare una pericolosità "moderata" alla liquefazione per gran parte del centro storico di San Felice, introducendo in tal modo un

dettaglio che nella mappa di pericolosità a liquefazione del PSC 2014 non poteva essere raggiunto.

In ogni caso, la presenza di IPL >5 calcolati su CPTu e, ancor più, la presenza di numerosi punti di manifestazione del fenomeno liquefazione a seguito del sisma del 2012, hanno indotto ad assegnare anche quest'area del centro storico alla classe di pericolosità "alta".

8.2.1. Calcolo dei cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dalle 52 CPTu/SCPTu è stato eseguito tenendo conto della sommatoria dei cedimenti che possono aver luogo sia nei terreni granulari insaturi, che in quelli granulari saturi, che in quelli coesivi soffici.

Per il calcolo dei cedimenti post-sismici nei livelli granulari saturi è stato utilizzato il metodo di Idriss & Boulanger (2008), implementato nel codice di calcolo "CLiq2" della Geologismiki®, che mette in relazione la deformazione volumetrica dovuta alla ri-consolidazione post-ciclica (ε_v %) con la resistenza alla punta (CPT) equivalente a sabbie pulite (q_{c1Ncs}) tramite la relazione:

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp\left(2.551 - 1.147 (q_{c1Ncs})^{0.264}\right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max}) \quad (4)$$

dove γ_{max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, integrando il risultato nello spessore d'interesse:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_v \cdot dz \quad (5)$$

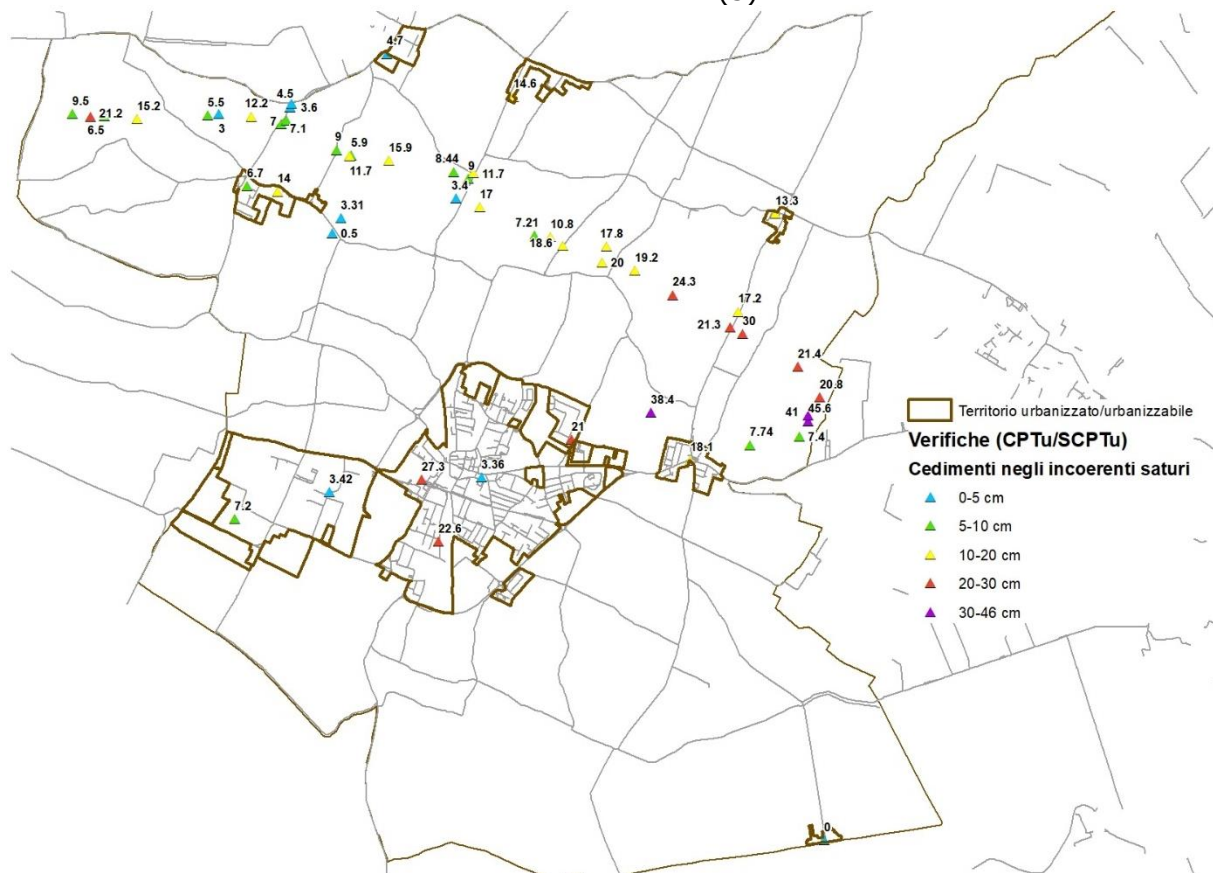


Figura 45 – Distribuzione dei cedimenti post-sismici calcolati in corrispondenza delle 52 CPTu/SCPTu utilizzate per questo studio. I valori numerici si riferiscono ai soli cedimenti post-simici nei livelli incoerenti saturi, poiché i livelli incoerenti insaturi e quelli coerenti, soffici non hanno evidenziato alcun cedimento.

Il risultato del calcolo è visibile in Figura 45. Qui sono riportati i soli cedimenti post-simici nei livelli incoerenti saturi, poiché i livelli incoerenti insaturi e quelli coerenti, soffici non hanno evidenziato alcun cedimento.

Il calcolo dei cedimenti nei terreni granulari insaturi è stato effettuato, sempre all'interno del codice di calcolo sopra citato, utilizzando le formule proposte da Robertson & Lisheng (2010), che sostanzialmente modifica il metodo di Pradel (1998), costruito sulle prove SPT, per adattarlo alle CPTu. Nella modifica proposta da Robertson & Lisheng (2010), la deformazione volumetrica dopo 15 cicli viene espressa in funzione della resistenza normalizzata alla punta equivalente per sabbie pulite ($Q_{tn,cs}$), dell'indice di comportamento del suolo (I_c) e della deformazione di taglio ciclica (γ), quest'ultima calcolata con Pradel (1998):

$$\varepsilon_{vol(15)} = \gamma \left[\frac{Q_{tn,cs}}{\frac{8.5(1-I_c/4.6)}{20}} \right]^{-1.2} \quad (6a)$$

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{vol(15)} \left(\frac{N_c}{15} \right)^{0.45} \quad (6b)$$

$$N_c = (M - 4)^{2.17} \quad (6c)$$

dove N_c è il numero equivalente di cicli per un sisma di magnitudo M .

Come detto, i risultati hanno portato a cedimenti dell'ordine di 1 mm, quindi non sono stati considerati.

Il calcolo dei cedimenti nei terreni coerenti poco consistenti è stato effettuato sia tramite il metodo proposto da Robertson (2009) che tramite il metodo proposto dalla DRG 630/2019. Per il metodo DGR 630/2019 si rimanda alla DGR stessa. Il metodo di Robertson (2009) si basa sul rapporto tra la variazione di tensione efficace indotta dal sisma ($\Delta\sigma'_v$) e il modulo edometrico (M) durante la ri-consolidazione, solitamente maggiore rispetto a quello statico (M_{CPT}):

$$\varepsilon_{vol} = (\Delta\sigma'_v/M) \quad (7a)$$

$$\Delta\sigma'_v = r_u \sigma'_{v0} \quad (7b)$$

$$r_u = [0.8 - 2.66 \log(FS)] / OCR \quad (7c)$$

$$M = M_{CPT} [10 - 9 \log(OCR)] \quad (7d)$$

dove FS è il fattore di sicurezza alla liquefazione che, per le argille, vede un $CRR_{7.5}$ modificato rispetto a quello per i terreni incoerenti.

Anche nel caso dei cedimenti nei livelli coerenti poco consistenti, i risultati conseguiti per questo studio hanno dimostrato valori sempre nulli, sia applicando il metodo Robertson (2009) che quello DGR 630/2019.

Come si vede in Figura 45, i siti con cedimenti più alti, dell'ordine di 30/40 cm, sono a nord e a nord-est di Rivara; valori più bassi, dell'ordine di 20/30 cm, si trovano nel centro del Capoluogo e lungo il tratto sud-orientale del tracciato di progetto della Autostrada Regionale Cispadana. Lungo il restante tratto del tracciato autostradale in progetto i valori sono in media di 10/20 cm e diminuiscono progressivamente a 5/10 cm verso il tratto nord-occidentale.

9. ELABORATI CARTOGRAFICI

Di seguito verranno descritti brevemente i contenuti delle cartografie prodotte per questo terzo livello di approfondimento della microzonazione sismica di San Felice sul Panaro. Considerando che in precedenza non sono stati eseguiti studi di microzonazione sismica di I e II livello sulla base delle indicazioni e degli standard di rappresentazione nazionali, in questa sede si è provveduto ad elaborare anche quelle cartografie di base per tutti i livelli d'analisi, ovvero la Carta geologico-tecnica e la Carta delle MOPS. Per motivi di compatibilità tra formato cartaceo adottato per la stampa (A0) e scala di rappresentazione (1:10.000), ogni carta è stata scomposta in due carte distinte (a, b) in base all'areale ricoperto.

- **La carta geologico-tecnica:** in essa vengono rappresentate le aree caratterizzate da un'omogenea litologia di superficie (primi 20/30 m dal piano campagna indagati dalle indagini penetrometriche e dai sondaggi a carotaggio), insieme alle forme di superficie e sepolte, agli elementi tettonico-strutturali ed agli elementi geologici ed idrogeologici, solitamente già disponibili nelle banche dati digitali regionali.
- **La carta delle indagini:** in essa vengono rappresentate le ubicazioni e le tipologie delle indagini (geognostiche e geofisiche) di nuova esecuzione, realizzate appositamente per condurre gli studi di terzo livello, insieme alle indagini pregresse.
- **La carta delle Vs:** in essa vengono rappresentati i valori di Vs (V_{s30}) derivati dalle numerose indagini geofisiche eseguite sul territorio, in particolare durante il periodo della ricostruzione post-sisma.
- **La carta delle frequenze:** in essa vengono rappresentati i valori della frequenza fondamentale di vibrazione del terreno derivati dalle indagini geofisiche eseguite in passato su tutto il territorio comunale, in particolare durante il periodo della ricostruzione post-sisma.
- **La carta delle MOPS:** generalmente elaborata già a partire dal primo livello di approfondimento, la carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica) è stata elaborata anche sulla scorta dei risultati delle indagini ed analisi del livello 3 di approfondimento oggetto di questo studio.
- **La carta di microzonazione sismica (MS_0203):** composta da 12 cartografie tematiche differenti, identifica le aree stabili suscettibili di amplificazioni locali, con fattori di amplificazione calcolati, per diversi intervalli temporali, da analisi di risposta sismica locale mono-dimensionale, e le zone di attenzione per instabilità (liquefazione), evidenziando anche i singoli valori di IPL in corrispondenza di ogni verticale penetrometrica; in essa vengono rappresentati anche gli indici di pericolosità *sensu* Naso et al. (2019).
- **La carta dei cedimenti post-sismici:** identifica l'entità stimata dei cedimenti causati dal ri-addensamento (nel breve tempo) dei livelli incoerenti saturi e insaturi e (nel lungo periodo) dei livelli coerenti poco consistenti, evidenziando i singoli valori di cedimento in corrispondenza di ogni verticale penetrometrica.

9.1. Carta geologico-tecnica

La carta, nella sua componente litostratigrafica già anticipata al capitolo 5 e rappresentata su base topografica semplificata in Figura 46, evidenzia immediatamente una netta prevalenza di terreni fini (argille e argille limose, con sporadiche intercalazioni di sottili livelli sabbiosi) nei settori nord-orientale, meridionale e centro-occidentale. I settori dominati da sabbie sono quelli corrispondenti al "dosso di Finale" e ad alcune limitate aree nel settore sud-orientale. Gli interstizi di queste due macro-aree sono costituiti da alternanze tra spessori argillosi e argilloso-limosi e spessori con sabbie e/o miscele sabbiose. Le forme di superficie sono rappresentate esclusivamente da paleoalvei, testimoni della passata dinamica idrografica ampiamente descritta nei capitoli 4.2.1 e 4.2.2. La misurazione della falda nei pozzi per acqua rivela una media di circa 3 m dal piano campagna, mentre gli unici pozzi che hanno raggiunto la profondità stimata del bedrock sismico sono due e collocati nel settore occidentale del

territorio; la stratigrafia del pozzo che ha raggiunto 180 m di profondità è stata utilizzata per ricostruire la sezione stratigrafica fino al bedrock sismico nelle analisi di risposta sismica locale eseguite per questo studio. La carta mostra, infine, la traccia dell'asse di anticlinale sepolta, in gran parte coincidente con l'asse del "dosso di Finale", ed il sovrascorrimento sepolto, certo, potenzialmente attivo e capace, che taglia il territorio comunale nel settore nord-orientale.

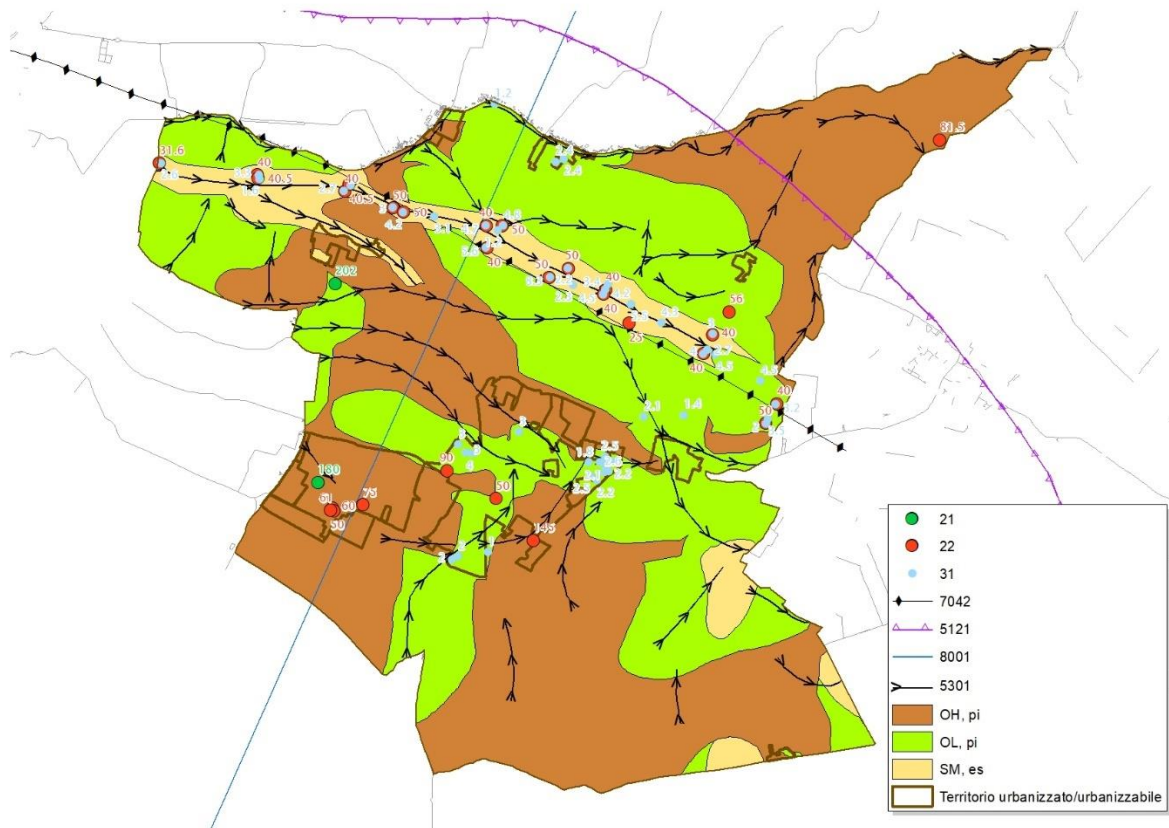


Figura 46 – Carta Geologico-tecnica su base topografica semplificata. **Legenda** – **21**: pozzo o sondaggio che ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m); **22**: pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m); **31**: profondità (m) della falda in aree con sabbie e/o ghiaie; **7042**: anticlinale; **5121**: faglia inversa potenzialmente attiva e capace (certa); **8001**: traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo; **5301**: asse di paleovalve; **OH-pi**: depositi alluvionali di piana inondabile, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da argille e argille limose prevalenti, mediamente consistenti, con intercalazioni sporadiche di miscele sabbiose e sabbie in sottili livelli; **OL-pi**: depositi alluvionali di piana inondabile, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da alternanze di argille e argille limose, mediamente consistenti, e sabbie e miscele sabbiose mediamente addensate; **SM-es**: depositi alluvionali di argine/barre/canali, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da miscele sabbiose e sabbie prevalenti, da mediamente a ben addensate.

9.2. Carta delle indagini

In gran parte già dettagliata nel capitolo 6 di questa relazione, la carta viene di seguito rappresentata nella sua interezza, su base topografica semplificata, in Figura 47 da cui è possibile osservare la distribuzione spaziale e le densità delle indagini stesse, con un'ovvia concentrazione nel Capoluogo e nella sua prima periferia. Anche le frazioni trovano una discreta densità di indagini, soprattutto a seguito della ricostruzione post-sisma.

Le indagini penetrometriche a punta meccanica rappresentano ancora la principale tipologia d'indagine penetrometrica sul territorio, nonostante la ricostruzione post-sisma abbia favorito un incremento sensibile nell'utilizzo della penetrometriche elettriche con piezocono.

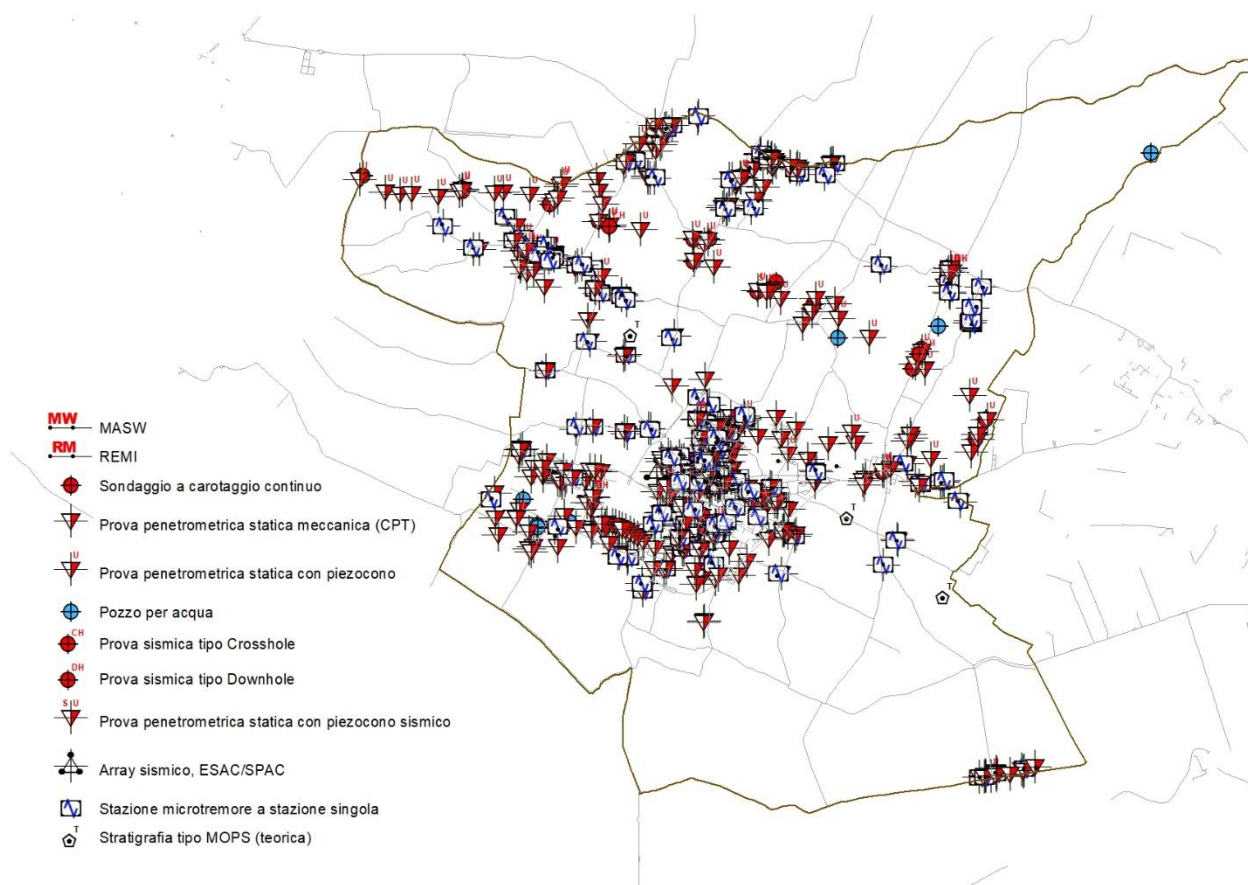


Figura 47 –Tavola di MS23 “Carta delle indagini” su base topografica semplificata, in cui sono rappresentate tutte le indagini d’archivio e di nuova esecuzione utilizzate per questo studio.

Tra le indagini geofisiche prevalgono di gran lunga quelle di superficie, attive (MASW e Re.Mi.) e passive (HVSr), mentre le indagini in foro (Down-hole), ancorché di numero decisamente inferiore (13), sono comunque distribuite abbastanza omogeneamente sul territorio, offrendo la possibilità di un robusto riferimento per le altre indagini di superficie; ad esse si aggiungono 2 prove Cross-Hole.

9.3. Carta delle Vs

La carta delle Vs mostra la distribuzione spaziale di tutti i valori di V_{s30} ricavati dalle indagini d’archivio presenti sul territorio comunale. Sono state considerate adeguate per tale rappresentazione le indagini di superficie MASW, Re.Mi. e ESAC-SPAC, e le prove Down-hole in foro di sondaggio (Figura 48).

Come per le indagini geognostiche, anche le indagini geofisiche trovano la maggior concentrazione nel Capoluogo e nella sua prima periferia, con maggior rarefazione nelle frazioni. Le densità più elevate si hanno in corrispondenza del centro storico, grazie alle numerose indagini effettuate nel corso della ricostruzione post-sisma. Tale densità non facilita una chiara distinzione grafica tra le varie prove.

Nel complesso, la V_{s30} media del territorio è prossima ai 190 m/sec., con un valore medio di 212 m/s ottenuto dalle indagini MASW e Re.Mi. e un valore più basso, di circa 160 m/s, ottenuto dalle indagini in foro.

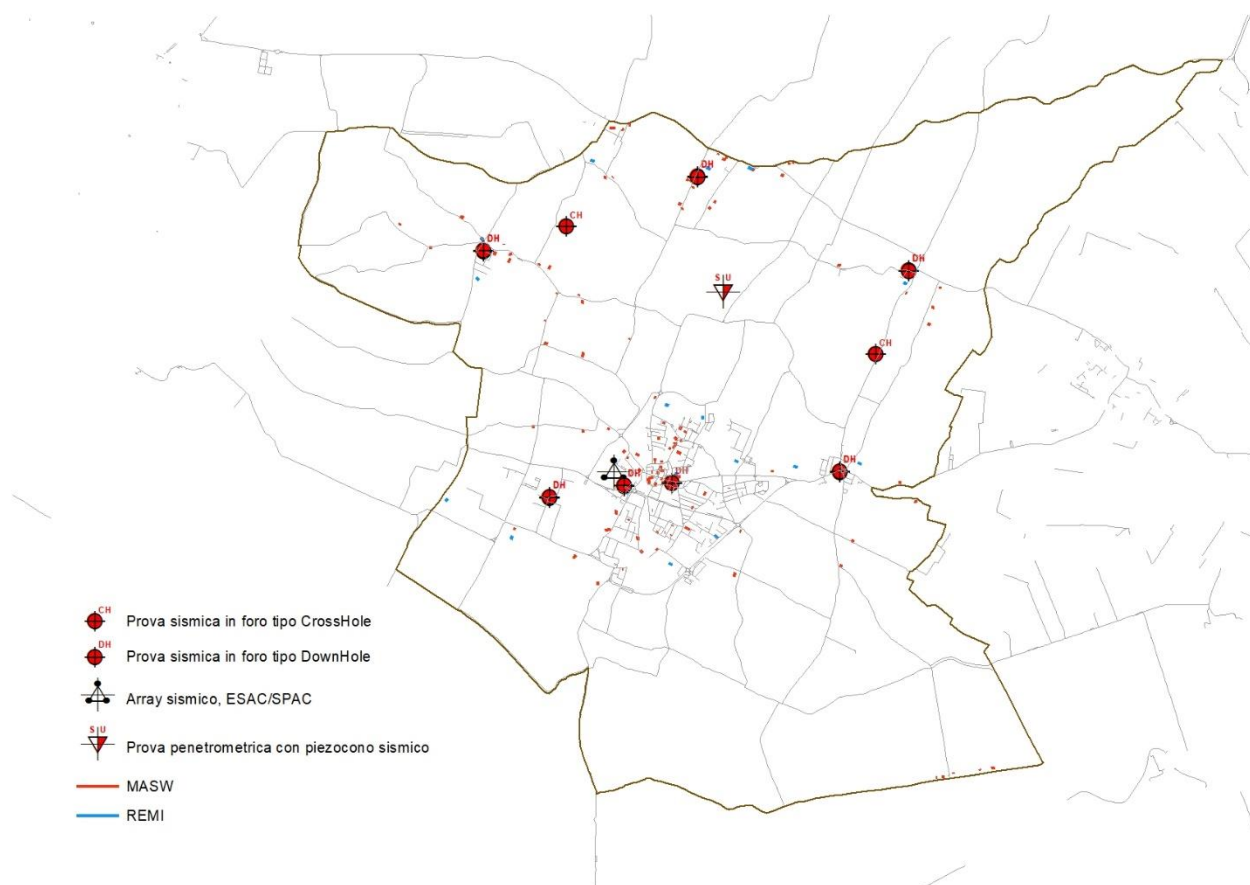


Figura 48 - Tavola di MS23 "Carta delle velocità delle onde di taglio" su base topografica semplificata, in cui sono rappresentate le ubicazioni e le tipologie delle indagini geofisiche da cui sono stati ricavati i valori di V_{s30} sul territorio.

9.4. Carta delle frequenze

Anche le misurazioni dei rapporti H/V tramite tomografia mostrano la stessa distribuzione spaziale delle altre tipologie di indagini sismiche e geognostiche.

Le frequenze fondamentali che hanno mostrato la maggiore amplificazione sono quelle comprese nell'intervallo tra 0,6 e 1 Hz e sono presenti su tutto il territorio (Figura 49). Frequenze maggiori (tra 1 e 2 Hz) si distribuiscono principalmente nella fascia settentrionale del territorio, con amplificazioni che rimangono comprese tra 2 e 3.

Anche i valori di frequenza inferiori a 0,6 mostrano una distribuzione omogenea su tutto il territorio, sebbene con valori di amplificazione generalmente più bassi, compresi tra 1,5 e 2.

E' interessante confrontare la distribuzione spaziale delle frequenze fondamentali, a cui corrisponde un ben definito picco d'amplificazione del rapporto H/V (≥ 3), con la profondità del bedrock sismico stimata per questo studio dall'analisi congiunta di indagini MASW e HVSR (Figura 50). Si può osservare come le frequenze comprese tra 0,6 e 1 Hz siano dominanti nella fascia di profondità del bedrock di 150 m e come spostandosi sia verso nord che verso sud vi sia una tendenza verso frequenze inferiori a 0,6 Hz, indicativa di un progressivo approfondimento del bedrock sismico, sostanzialmente in linea con quanto ricavato dalle puntuali analisi congiunte.

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



Frequenza picco significativo (Hz)	Ampiezza picco			
	< 1,5	1,5 ≤ H/V < 2	2 ≤ H/V < 3	H/V ≥ 3
Assenza di fenomeni di risonanza significativi			●	
$f_0 \leq 0,6$		■	●	●
$0,6 < f_0 \leq 1$	▲	■	●	●
$1 < f_0 \leq 2$	▲	■	●	●
$2 < f_0 \leq 8$	▲	■		
$f_0 > 8$				

A lato del simbolo sono riportate le frequenze del primo picco significativo

Figura 49 - Tavola di MS23 "Carta delle frequenze" in cui sono rappresentate le ubicazioni delle indagini tomografiche d'archivio, insieme ai valori di frequenza fondamentale di vibrazione del terreno e relativa amplificazione.

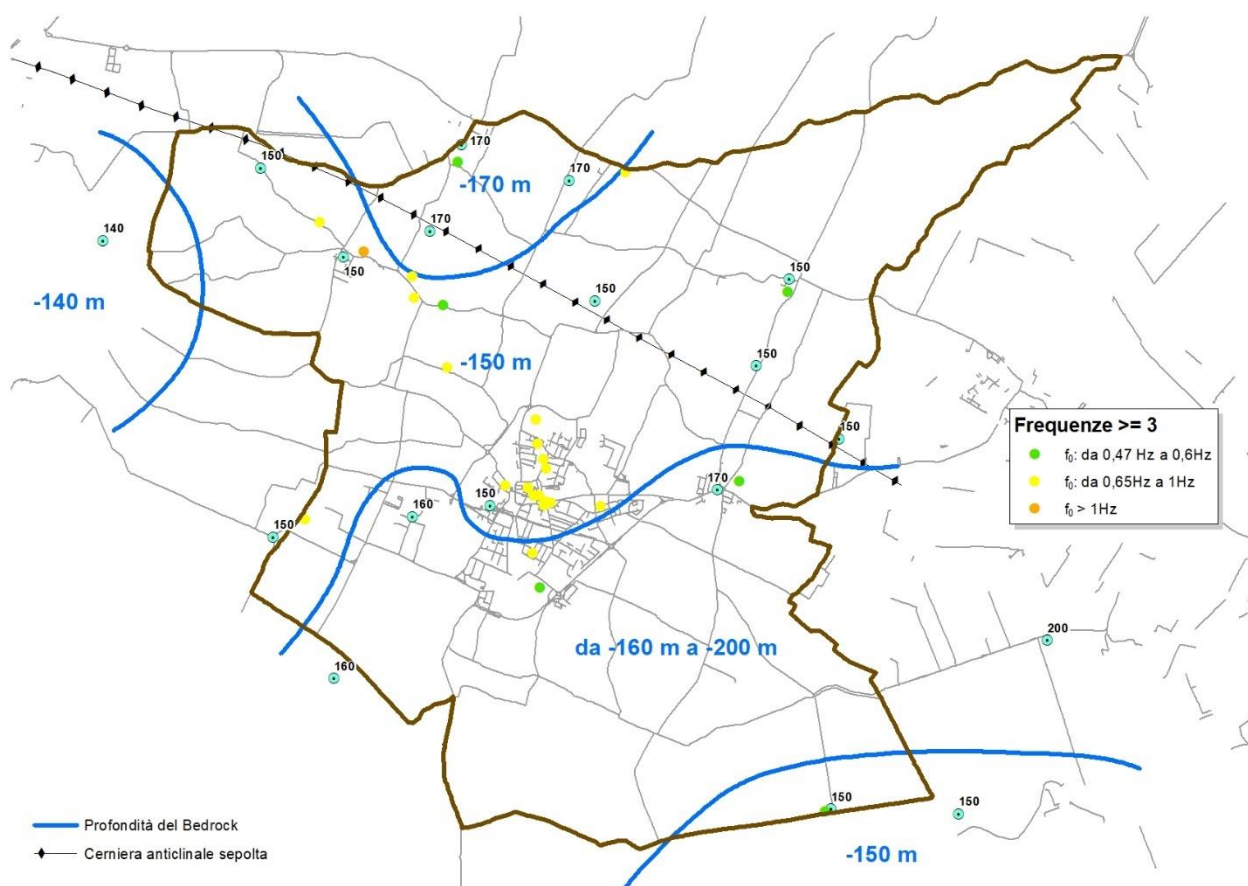


Figura 50 – Confronto tra i valori delle frequenze fondamentali del terreno corrispondenti a rapporti H/V superiori a 3 (picco ben definito) e le profondità del bedrock sismico ricostruite per questo studio da analisi congiunta di indagini MASW e HVSR. Per i colori delle frequenze si veda la tabella di Figura 49.

9.5. Carta delle MOPS

Come richiesto dagli Standard di microzonazione sismica nazionali più recenti (versione 4.1, 2018), le MOPS vengono estese all'intero territorio comunale. Questo introduce un'inevitabile grado di incertezza in quelle aree mai indagate da indagini geognostiche, che sono principalmente il settore meridionale (escluso l'abitato di Dogaro) e l'estremità nord-orientale. Per queste aree non indagate, come anticipato nel capitolo 5, si è optato per una assunzione litostratigrafica che tiene conto sia della distribuzione delle litologie dei primi 2 m più superficiali, sia della geomorfologia (entrambe note dal QC del PSC): in pratica, nelle aree in cui la combinazione tra litologia più superficiale e geomorfologia risulta simile a quella di aree indagate da indagini geognostiche, la litostratigrafia di quest'ultime è stata estrapolata anche alle prime.

A seguire, vengono descritti tutti i modelli sismostratigrafici che caratterizzano le microzone omogenee dell'intero territorio comunale, costituite da 1 microzona **stabile, suscettibile di amplificazione** (zona 2001), e da 2 microzone di **attenzione per instabilità** (zone 30502002 e 30502003). Le microzone di attenzione per instabilità (leggasi "liquefazione") sono contrassegnate in carta da un retino a maglia quadrata su sfondo del colore relativo alla classe sismostratigrafica (Figura 51).

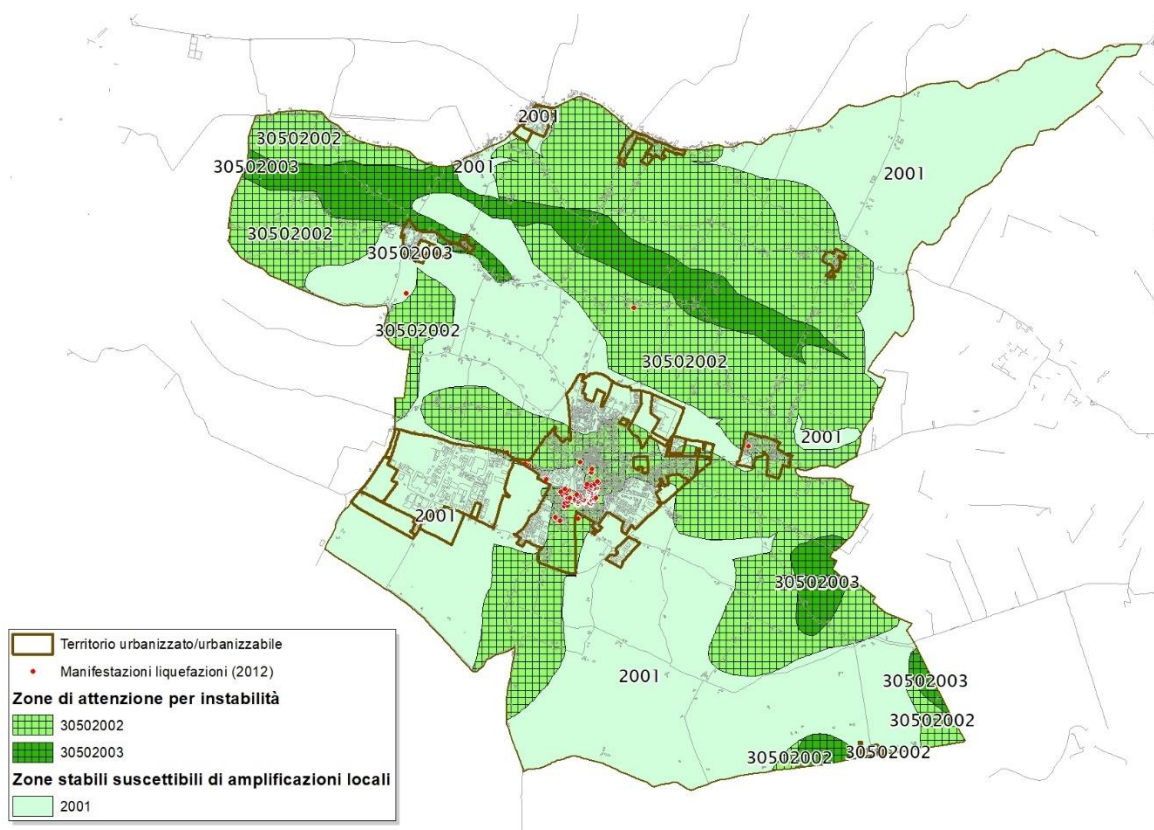
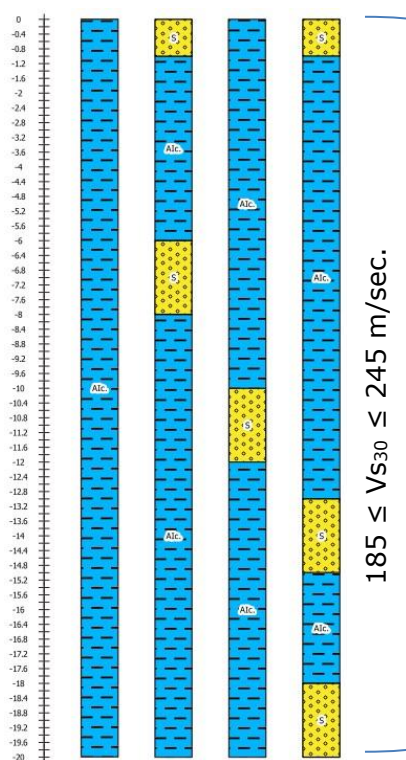


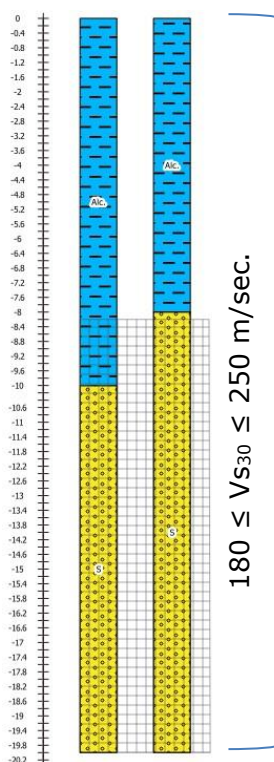
Figura 51 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) su base topografica semplificata. Per maggior chiarezza grafica si è scelto, per questa figura, di eliminare, rispetto alla stessa carta prodotta per la stampa, i paleovalvi (già rappresentati nella Carta geologico-tecnica di Figura 49) ed i punti di misurazione del rumore ambientale, che sono stati rappresentati nell'apposita cartografia. Le microzone sono descritte a seguire, nel testo.

I modelli sismostratigrafici si compongono del dato litostratigrafico descritto al capitolo 5, combinato alla velocità ponderata delle onde "S" nei primi 30 m ed alla possibilità che la stratigrafia sia o meno suscettibile di instabilità (leggasi: liquefazione), ipotizzando anche l'intervallo di profondità più suscettibile al fenomeno.

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

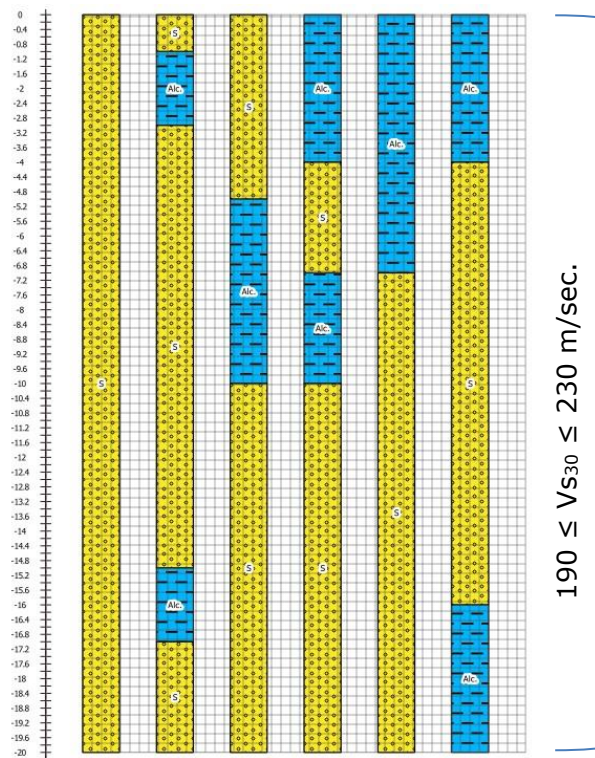


ZONA 1 (2001) – Zona 1: Depositi alluvionali di piana inondabile, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da argille e argille limose prevalenti, mediamente consistenti, con intercalazioni sporadiche di miscele sabbiose e sabbie in sottili livelli; $185 \leq V_{s30} \leq 245$ m/sec.



ZONA 2 (30502002) – ZALQ - Zona di Attenzione per Liquefazioni - Zona 2002: Depositi alluvionali di piana inondabile, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da alternanze di argille e argille limose, mediamente consistenti, e sabbie e miscele sabbiose mediamente addensate; $180 \leq V_{s30} \leq 250$ m/sec. In linea di massima, i livelli suscettibili di liquefazione ricadono in un intervallo di profondità compreso tra 8 e 20 m.

COMUNE DI SAN FELICE S/P – PROVINCIA DI MODENA
MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
RELAZIONE ILLUSTRATIVA



ZONA 3 (30502003) – ZAL_Q - Zona di Attenzione per Liquefazioni - Zona 2003: Depositi alluvionali di argine/barre/canali, costituiti, nei primi 20 m dal piano campagna, da miscele sabbiose e sabbie prevalenti, da mediamente a ben addensate; $190 \leq V_{s30} \leq 230$ m/sec. In linea di massima, i livelli suscettibili di liquefazione non ricadono in un intervallo di profondità ben determinato.

9.6. Carta di microzonazione sismica (MS_0203)

La carta di microzonazione sismica di MS23 realizzata per questo studio copre le porzioni di territorio comunale urbanizzate ed urbanizzabili (quest'ultime come da PSC), a cui sono state aggiunte le direttrici lineari della ferrovia e della Autostrada Regionale Cispadana in progetto. Per quanto riguarda, quindi, i fattori di amplificazione, ma anche gli **indici di pericolosità sensu Naso et a. (2019)**, il livello raggiunto è il III.

Le zone per le quali la disponibilità di indagini CPTu/SCPTu ha permesso di quantificare il grado di instabilità (per liquefazione), sono state identificate come **“zone suscettibili di instabilità”** e classificate in base al criterio indicato dagli standard di rappresentazione nazionali. In queste stesse zone, in corrispondenza di ogni verticale penetrometrica utilizzata per il calcolo dell'IPL è stato indicato il valore numerico del parametro indice. In questo caso, il livello di approfondimento raggiunto è il III.

Le cartografie che compongono la microzonazione di livello 2/3 sono 12, in base a quanto richiesto dalla DGR 630/2019 e s.m.i., e di seguito elencate.

1. Carta dei fattori di amplificazione⁷ della PGA,
2. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (SA1),
3. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,4-0,8 sec. (SA2),
4. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,7-1,1 sec. (SA3),
5. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,5-1,5 sec. (SA4),
6. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (SI1),
7. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,5-1,0 sec. (SI2),
8. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,5-1,5 sec. (SI3),
9. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec.²), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM}),
10. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec.²), nell'intervallo 0,4-0,8 sec. (H₀₄₀₈),
11. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec.²), nell'intervallo 0,7-1,1 sec. (H₀₇₁₁),
12. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec.²), nell'intervallo 0,5-1,5 sec. (H₀₅₁₅).

Per brevità di trattazione, a seguire verranno descritte solo le seguenti carte:

1. dei fattori di amplificazione della PGA,
2. dell'Intensità di Housner nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (SI1),
3. dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec.²), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM}).

⁷ Per l'intero territorio di San Felice, l'amplificazione sismica è soltanto dovuta alla litostratigrafia: la componente topografica è stata valutata nulla per tutto il territorio.

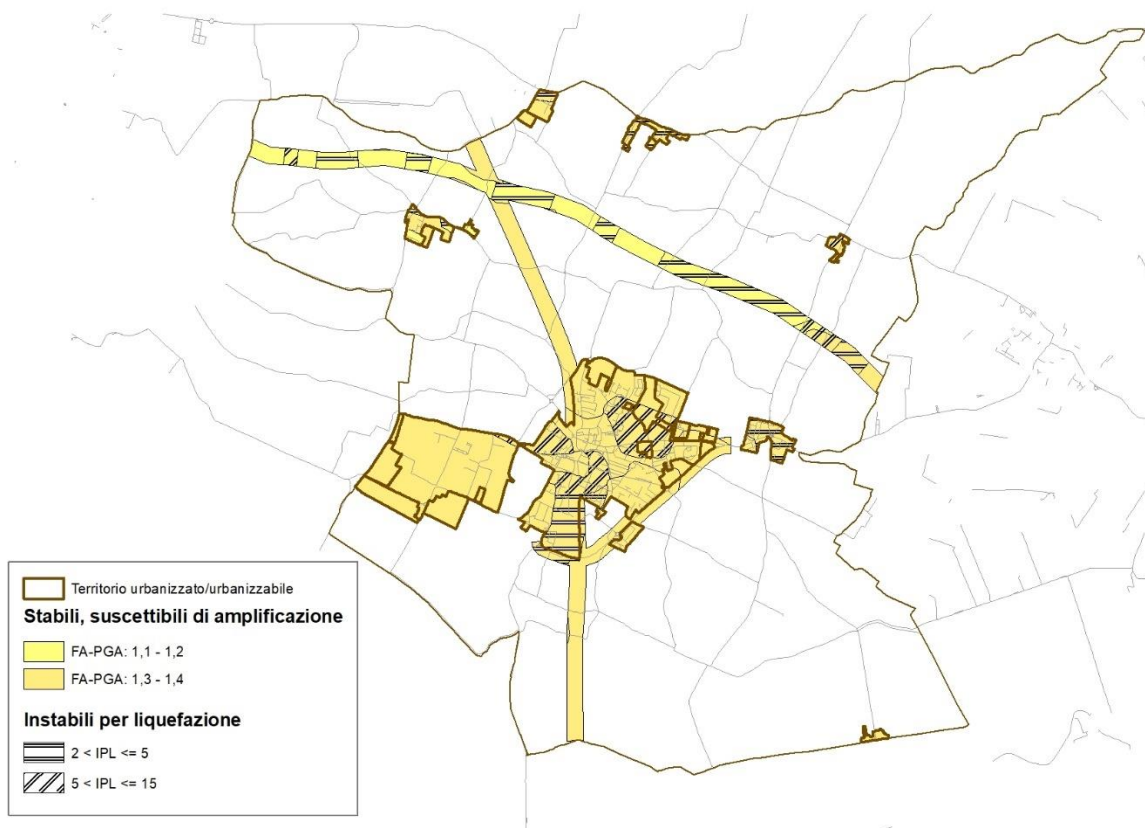


Figura 52 – Carta dei fattori di amplificazione della PGA (base topografica semplificata).

La prima, rappresentata in forma semplificata in Figura 52, mostra in sostanza la sovrapposizione di quanto già presentato in Figura 42.

Le aree soggette a maggiori amplificazioni litostratigrafiche sono quelle del settore centrale, che comprende il Capoluogo e Rivara. Le zone maggiormente suscettibili a liquefazione sono quelle del centro del Capoluogo, dell'intero abitato di Pavignane e di alcuni segmenti della fascia interessata dal progetto della Autostrada Regionale Cispadana.

Anche per l'Intensità di Housner nell'intervallo di periodi 0,1-0,5 sec. (Figura 53), i fattori di amplificazione maggiori sono pertinenti al settore centrale, ad eccezione del centro storico del Capoluogo e dell'abitato di Rivara.

La carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec^2), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM}) (Figura 54) mostra come vi sia omogeneità sull'intero territorio analizzato, con un livello di pericolosità sismica "**moderata**", che prevede un danno potenziale "da moderato ad alto" ed equiparabile ad un'intensità strumentale di VIII (Figura 55).

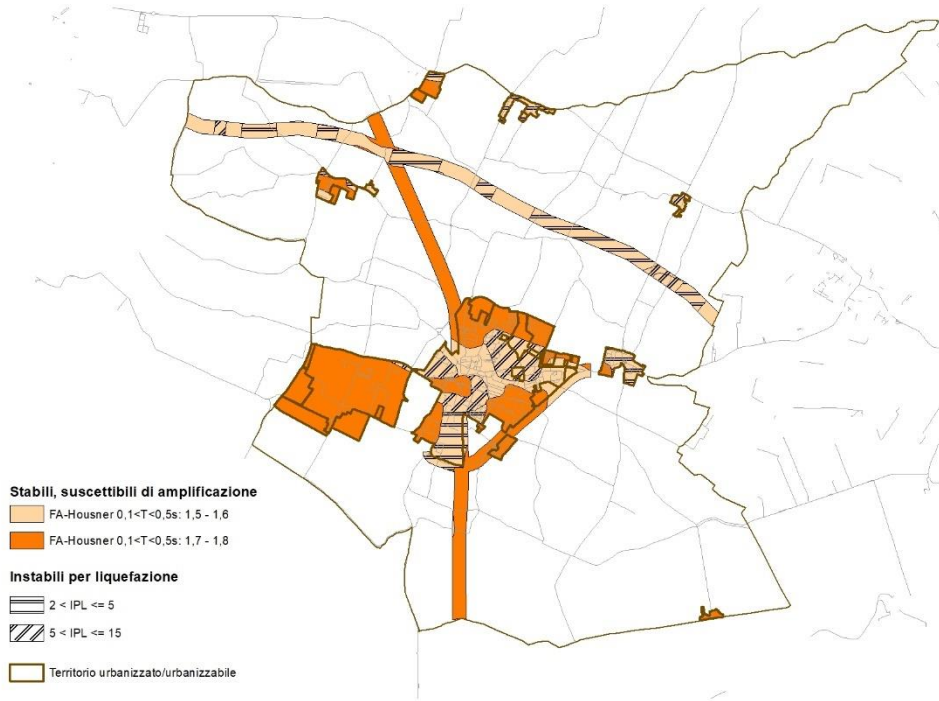


Figura 53 - Carta dei fattori di amplificazione dell'Intensità di Housner nei periodi 0,1-0,5 sec. (semplificata).



Figura 54 - Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec²), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (HSM) (semplificata). Colorazione in base alla proposta cromatica della Regione Emilia-Romagna.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s ²)	≤ 180	180 < H_{SM} ≤ 340	340 < H_{SM} ≤ 650	650 < H_{SM} ≤ 1240	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	≤ VI	VII	VIII	IX	≥ X

Figura 55 – Soglie possibili per il parametro HSM ed altri parametri fisici. Da: Naso et al. (2019). N.B.: i colori non corrispondono a quelli utilizzati in Figura 54.

9.7. Carta dei cedimenti post-sismici

Come mostrato al capitolo 8.2.1, il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dalle 52 CPTu/SCPTu è stato eseguito tenendo conto della sommatoria dei cedimenti che possono aver luogo sia nei terreni granulari insaturi, che in quelli granulari saturi, che in quelli coesivi soffici. In realtà, i risultati hanno dimostrato come il contributo ai cedimenti sia totalmente ascrivibile ai soli livelli granulari saturi.

La carta mostra pertanto solo i valori di cedimento relativi a tali livelli, la cui distribuzione spaziale è già stata descritta nel medesimo capitolo da cui si riportano, a seguire, le medesime conclusioni:

- i siti con cedimenti più alti, dell'ordine di 30/40 cm, sono a nord e a nord-est di Rivara;
- valori più bassi, dell'ordine di 20/30 cm, si trovano nel centro del Capoluogo e lungo il tratto sud-orientale del tracciato di progetto della Autostrada Regionale Cispadana;
- lungo il restante tratto del tracciato autostradale in progetto i valori sono in media di 10/20 cm e diminuiscono progressivamente a 5/10 cm verso il tratto nord-occidentale.

10. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI

A seguito degli eventi sismici del maggio-giugno 2012, è stata condotta una campagna di rilevamento AeDES sull'intero territorio comunale, volta al rilevamento dei danni agli edifici. La mappa dei danni è stata realizzata, su base catastale, a partire dai primissimi giorni successivi all'avvio dei sopralluoghi da parte dei rilevatori della Protezione Civile. I danni rilevati hanno riguardato diffusamente il territorio comunale, con percentuali maggiori di danno nel territorio rurale, dove il patrimonio edilizio è stato segnatamente colpito, con crolli molto consistenti, anche a causa della vulnerabilità intrinseca degli edifici più vecchi, spesso non più utilizzati e quindi non sottoposti a regolare manutenzione.

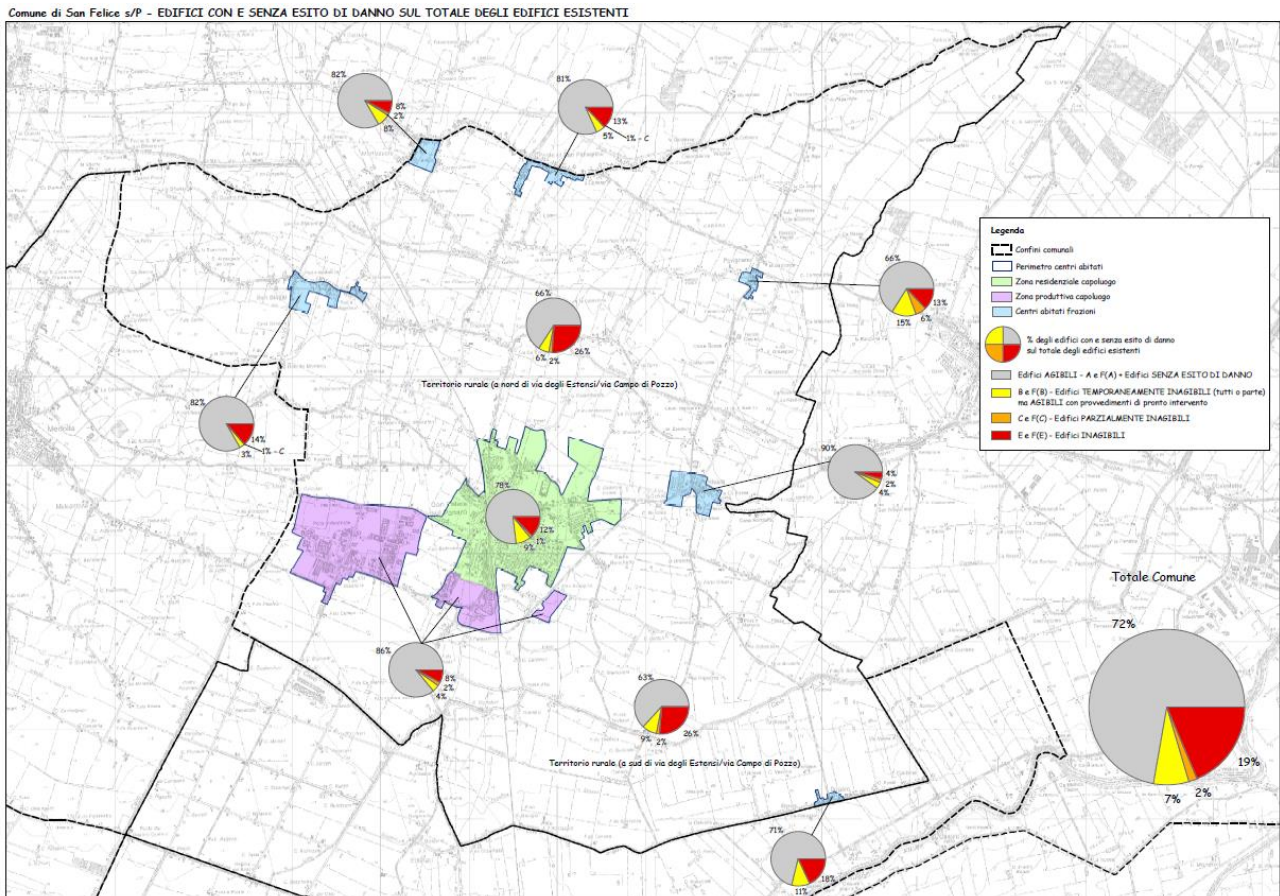
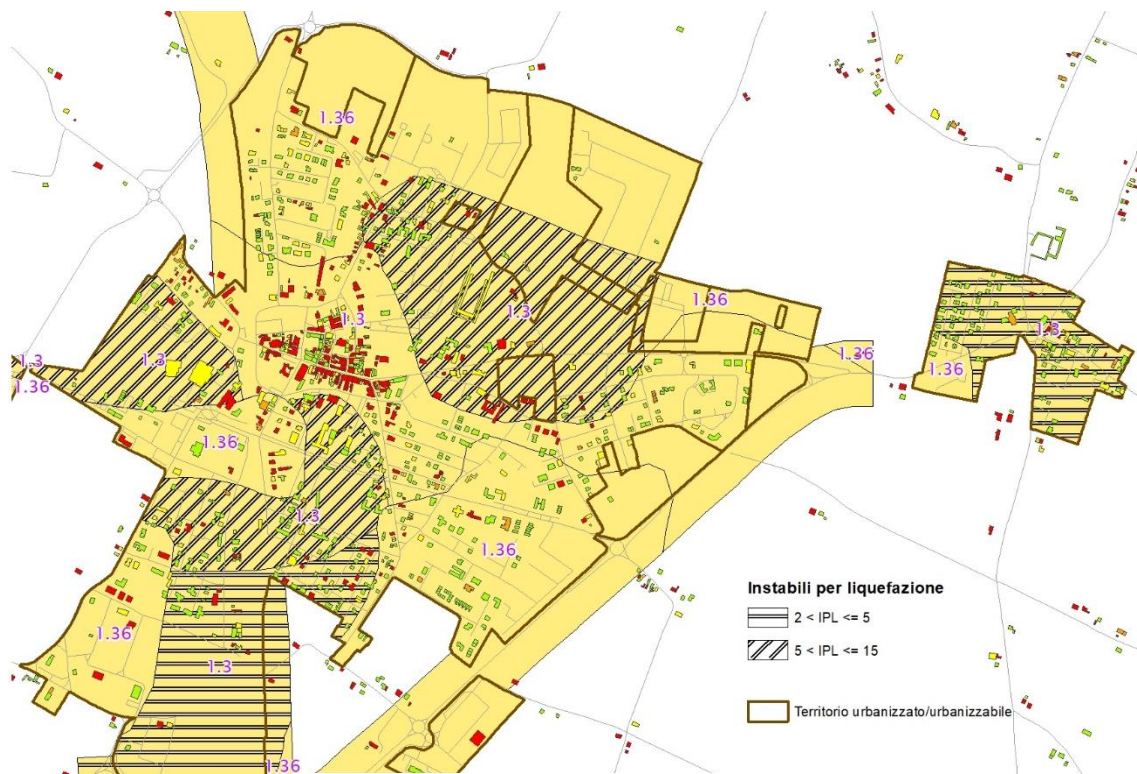


Figura 56 – Carta degli edifici con e senza esito di danno sul totale degli edifici esistenti. Fonte: Relazione QC del Piano della Ricostruzione – 2° Stralcio del Comune di San Felice s/P. (2014).

La carta degli edifici rilevati dalle schede AeDES (Figura 56) mette immediatamente in evidenza quanto sopra anticipato, ovvero la maggior percentuale (sul totale degli edifici esistenti) di edifici inagibili (E) nel territorio rurale rispetto ai centri abitati. In questi ultimi, la percentuale di edifici inagibili si mantiene tutto sommato costante su valori prossimi al 13%, con eccezioni rappresentate da Rivara (4%) e i comparti artigianali del Capoluogo (8%). Questa evidenza porta ad ipotizzare una omogeneità di comportamento al sisma da parte dell'intero territorio edificato.

Se poi si sovrappongono gli edifici rilevati dalle schede AeDES con la carta dei **fattori di amplificazione della PGA** realizzata per questo studio, si vede come non vi sia alcuna correlazione tra entità di danno (ovvero percentuale di edifici danneggiati su edifici totali) e classi di amplificazione sismica. Si porta come esempio l'area che comprende il Capoluogo e Rivara (Figura 57). Il centro del Capoluogo, nonostante ricada in una classe di amplificazione identica rispetto a Rivara, ha un numero molto superiore di edifici inagibili rispetto alla frazione.



- Edifici inagibili (E) o edifici soggetti a tutela ai sensi del D.Lgs. 42/2004 danneggiati
- Edifici parzialmente inagibili (C)
- Edifici temporaneamente inagibili (tutto o parte) ma agibili con provvedimenti di pronto intervento (B)
- Edifici agibili (A)

Gli edifici inagibili per rischio esterno (F) sono stati individuati con l'esito intrinseco segnalato nella scheda AeDES

Figura 57 – Sovrapposizione degli edifici rilevati dalle schede AeDES con la carta dei fattori di amplificazione della PGA elaborata per questo studio. I numeri in fucsia: fattore di amplificazione della PGA.

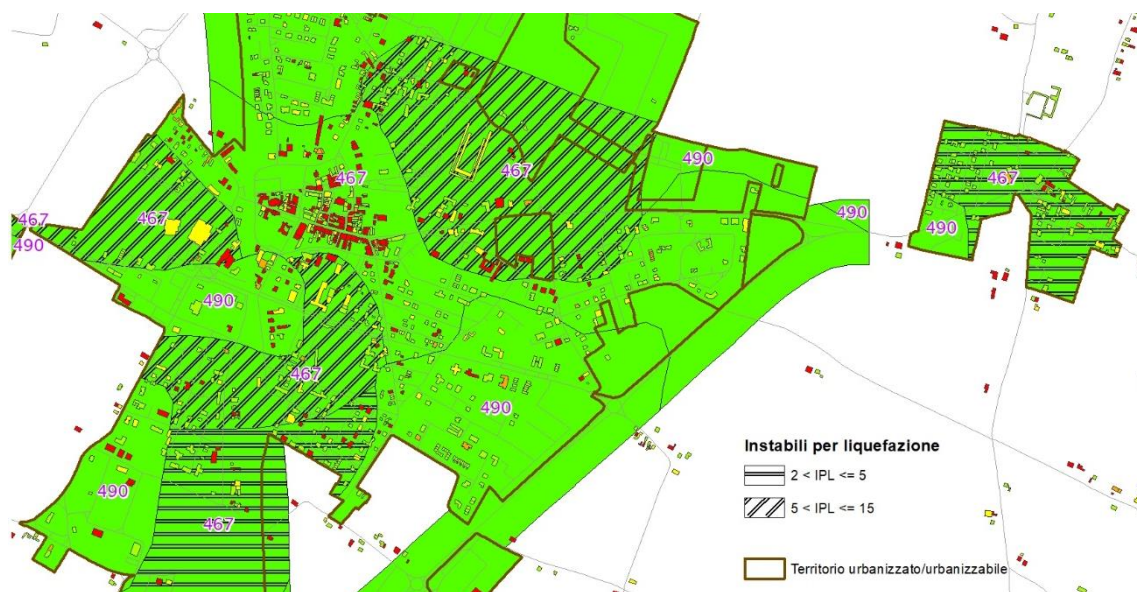


Figura 58 - Sovrapposizione degli edifici rilevati dalle schede AeDES con la carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (cm/sec²), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (HSM, numeri in fucsia).

Gli edifici inagibili del Capoluogo sono per la maggior parte all'interno del centro storico; se si osservano gli edifici inagibili nella periferia di più recente costruzione, sia a sud che a est e, in minor modo a nord, la densità di edifici inagibili è paragonabile a quella di Rivara.

Lo stesso vale nel confronto tra edifici inagibili e mappa dello scuotimento in accelerazione atteso al sito (Figura 58): la classe di scuotimento del centro del Capoluogo e di Rivara è la stessa (467 cm/s^2), ma mentre per il primo la quasi totalità degli edifici è inagibile, a Rivara, la densità di edifici inagibili, come detto, è largamente minore.

E' possibile, quindi, ipotizzare che, dai confronti eseguiti, ciò che verosimilmente ha maggiormente inciso sul rischio sismico di San Felice in occasione degli eventi del 2012 sia non tanto la condizione sismostratigrafica del territorio, tutto sommato piuttosto uniforme, bensì la vulnerabilità intrinseca dell'edificato.

11. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Pileggi D., Puzzilli L.M., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April 2009 l'Aquila (Italy) earthquake, *Boll.Geofis.Teor.Appl.*, 52, 3, 513-538, DOI 10.4430/bgta0013.
- Boccaletti, M., Bonini, M., Corti, G., Gasperini, P., Martelli, L., Piccardi, L., Severi, P., Vannucci, G., 2004. Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000 - Note illustrative (M. Boccaletti & L. Martelli (eds.)). Servizio Geologico, sismico e dei suoli - Regione Emilia-Romagna, S.EL.CA. Firenze.
- 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.
- Bonini, M., 2007. Interrelations of mud volcanism, fluid venting, and thrust-anticline folding: Examples from the external northern Apennines (Emilia-Romagna, Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 112, DOI: 10.1029/2006JB004859.
- Bonini, M. 2008. Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy). *Geology* 36, 2, 131-134.
- Bonini, M., Tanini, C., 2009. Tectonics and quaternary evolution of the Northern Apennines watershed area (upper course of Arno and Tiber rivers, Italy). *Geol. J.* 44, 2–29.
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M., 2014. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Davis, California.
- Cassano E., Anelli L., Fichera R., Cappelli V., 1986. Pianura Padana. Interpretazione integrata di dati geofisici e geologici - 73° Congresso Società Geologica Italiana, 29 Settembre - 4 ottobre 1986 Roma.
- Cremaschi M., Marchetti G., Dall'aglio P.L., 1988. Diretrici di traffico. I. Il settore emiliano - in: Studi e documenti di archeologia. Numero speciale dedicato alla IX Biennale d'arte antica, IV 1988, Nuova Alfa Editoriale.
- Facciorusso, J., Madiari, C., Vannucchi, G., 2016. Correction of Mechanical CPT Data for Liquefaction Resistance Evaluation, in: Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16). Prague, Czech Republic, pp. 1–9.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12. Oakland, CA.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., 2016.

DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.

Martelli, L., Bonini, M., Calabrese, L., Corti, G., Ercolessi, G., Molinari, F. C., Piccardi, L., Pondrelli, S., Sani, F., Severi, P., 2017a. Note illustrative della carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe. D.R.E.AM. Italia.

Martelli, L., Ercolessi, G., Sani, F., Bonini, M., Corti, G., Santulin, M., Tamaro, A., Rebez, A., Slejko, D., 2017b. Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino settentrionale - Proposta di nuova zonazione sismogenica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche. Bologna, 36 p.

Martelli, L., Romani, M., 2012. Microzonazione sismica e analisi condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012 (Ordinanza del Commissario delegato - Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012). Bologna, 41 p.

Martelli, L., Romani, M., 2013. Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012 (Ordinanza del commissario delegato n. 70/2012), Relazione illustrativa.

Mascandola, C., Massa, M., Barani, S., Albarello, D., Lovati, S., Martelli, L., Poggi, V., 2019. Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 109, 164–177.
<https://doi.org/10.1785/0120180193>

Naso, G., Martelli, L., Baglione, M., Brammerini, F., Castenetto, S., D'Intinosante, V., Ercolessi, G., 2019. Maps for land management: from geology to seismic hazard. *Boll. di Geofis. Teor. ed Appl.* 60.

Panizza, M., Castaldini, D., Pellegrini, M., Giusti, C., Piacentini, D., 2004. Matrici geo-ambientali e sviluppo insediativo: un'ipotesi di ricerca, in: Mazzeri, C. (Ed.), *Per Un Atlante Storico Ambientale Urbano*. APM Edizioni, Carpi, pp. 31–51.

Petronio, L., Affatato, A., Baradello, L., Barbagallo, A., Cristofano, G., Sorgo, D., Lai, C., Poggi, V., 2018. Shear wave seismic reflection survey in the 2012 Emilia epicentral area, in: *GNGTS 2018*. pp. 443–447.

Pieri M., Groppi G., 1981. Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy - *Pubbl.* 414, P.F. Geodinamica, CNR, 23 p.

Pondrelli, S., Salimbeni, S., Perfetti, P., Danecek, P., 2012. Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence. *Annals of Geophysics*, 55(4), 615–621. <https://doi.org/10.4401/ag-6146>.

Pradel, D., 1998. Procedure to Evaluate Earthquake induced Settlements in Dry Sandy Soils. *J. Geotech. Eng. - ASCE* 124, 364–368.

Robertson, P.K., 2009. Performance based earthquake design using the CPT, in: International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Tokyo, Japan, p. 21.

Robertson, P.K., Lisheng, S., 2010. Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT, in: Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Symposium in Honor of Professor I. M.

Idriss. San Diego, California, p. Paper No. 4.05a.

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

Yang, J., Yan, X.R., 2009. Site response to multi-directional earthquake loading: A practical procedure. Soil Dyn. Earthq. Eng. 29, 710–721.

ALLEGATO 1

Indagini geognostiche d'archivio dal database geognostico della Regione Emilia-Romagna

Pratica N° 3270 162

COMPENSORIO

1	1

1811140

COMUNE-Istat

P606

Codice Fiscale 00747540151

-Ditta PURINA ITALIA S.p.A

residente a S. FELICE SUL PANARO in via DELL'INDUSTRIA n° 6

-Pozzo ad uso INDUSTRIALE in Comune di S. FELICE SUL PANARO

Frazione = Località POLO INDUSTRIALE Mapp. N° 6841 / Fg. 38/43

-Data di ultimazione della perforazione: 03/09/1983

-Ditta perforatrice: SPETTOLLE PARISINI - VIA MACCAFERRI 23 - GALLIERA (BOLOGNA)

CARATTERISTICHE DEL POZZO

*avanpozzo (si o no) NO
 *diametro interno tubi mm. 165
 *profondità mt. 180

EQUIPAGGIAMENTO

*tipo della pompa
POMPA SOMMERSA UTA DL 5110/10
F550
 *potenza $\frac{cv}{kw}$ 5,5 / 4
 *prevalenza mt. 50 ÷ 90
 *portata lt/sec. MIN. 148 ÷ 150
 *tubo pompa ϕ mm. 50,8

-Livello statico mt. 8,00
 -Livello dinamico mt. 12
 -Portata pozzo: lt/sec. 12

-Superficie irrigata:
 ha. are ca.

-Consumo giornaliero (24 ore):
 metri cubi

La Ditta sottoscritta afferma, sotto la propria responsabilità, che la presente dichiarazione è completa e veritiera.

Data 26/08/84

Firma

PURINA ITALIA S.p.A.

Stab. di SAN FELICE s/ P.

G. Pavesi

N.B. : Qualora la Ditta sia in possesso di referti di analisi dell'acqua del pozzo, rilasciati da Laboratori o Gabinetti, è invitata ad allegarne copia.

STRATIGRAFIA DEL TERRENO

Indicare la natura dei terreni e le FALDE ACQUIFERE attraversate

Falde captate

-da mt. 0,00 a mt. 2,00

TERRENO VEGETALE

-da mt. 2,00 a mt. 18,00

ARGILLA COMPATTA BIANCA

-da mt. 18,00 a mt. 40,00

SABBIA GROSSA

-da mt. 40,00 a mt. 60,00

ARGILLA

-da mt. 60,00 a mt. 80,00

SABBIA

-da mt. 80,00 a mt. 102,00

ARGILLA

-da mt. 102,00 a mt. 112,00

SABBIA CON ACQUA SALATA

-da mt. 112,00 a mt. 170,00

ARGILLA

Localizzazione del pozzo

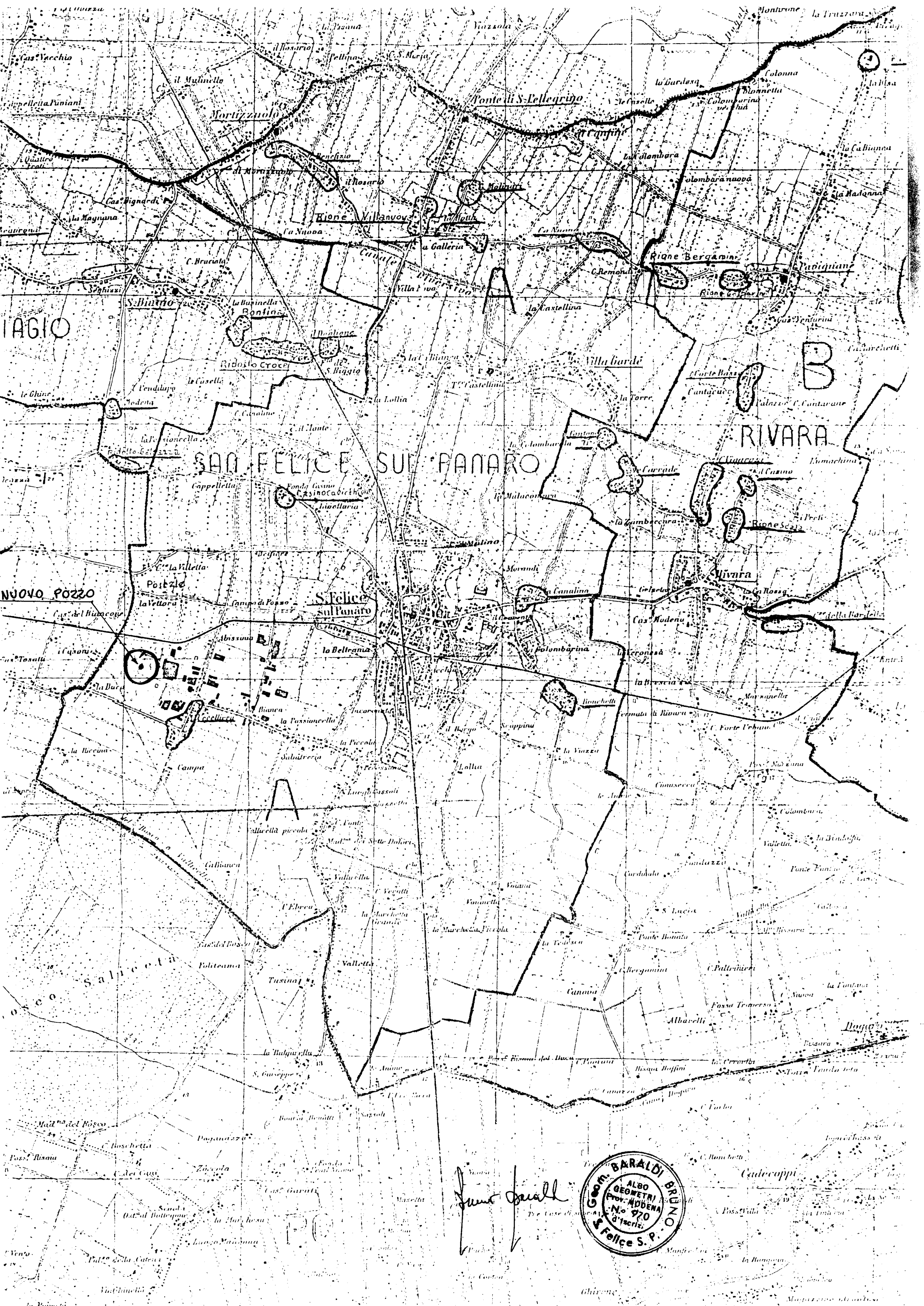
Long.	<u>335</u>	Lat.	<u>066</u>	Ha.	<u> </u>
Quota piano campagna: m.s.l.m.				<u>1172</u>	<u> </u>

ANNOZZIONI: - DA mt. 170,00 a mt. 180,00

SABBIA FILTRATA

- SI ALLEGA CERTIFICATO DI ANALISI n° 1768

DEL 14/09/1983



Luigi Baraldi
D. e C. di S. Felice S. P.



IAGIO

NUOVO POZZO

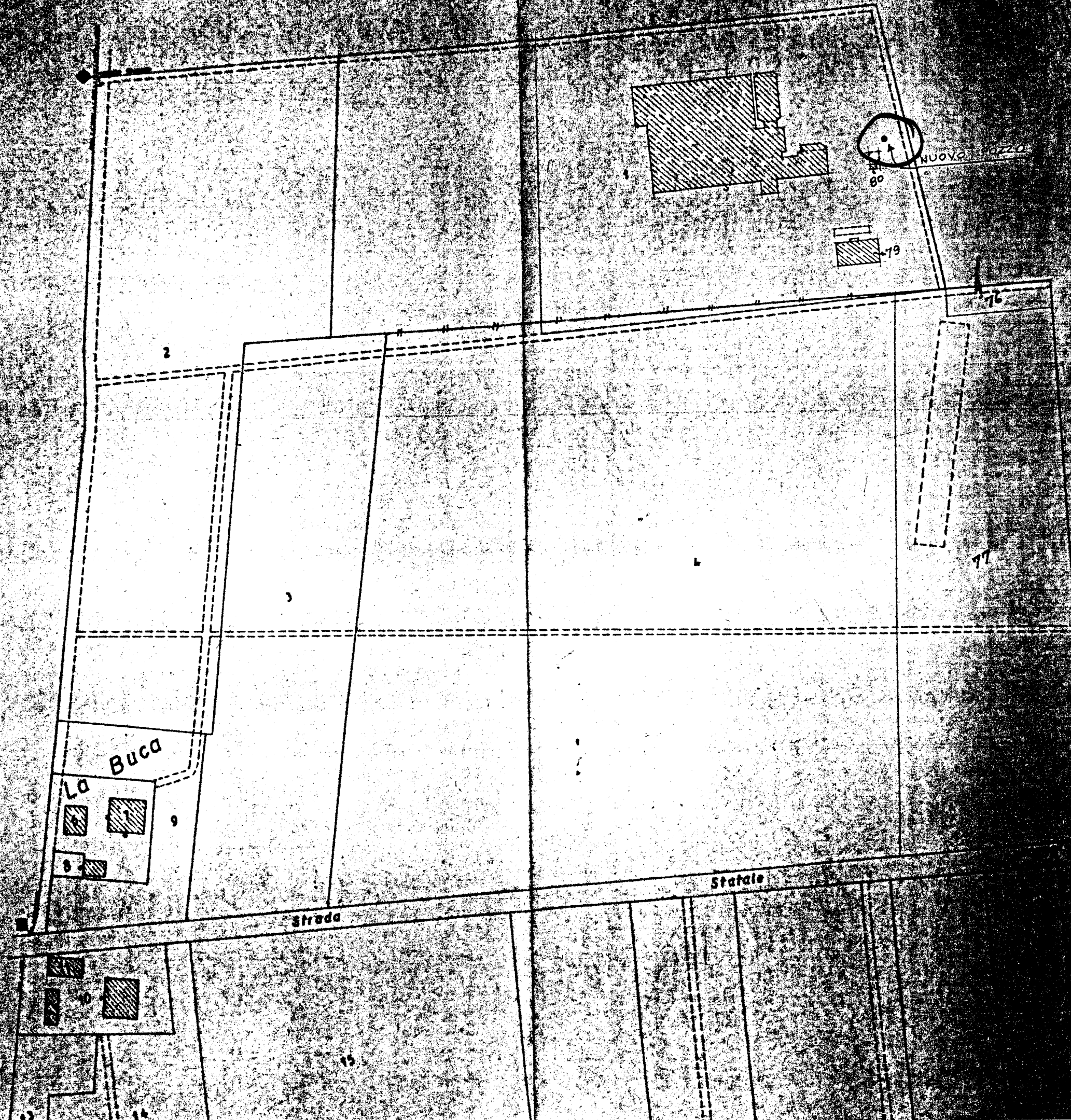
SAN FELICE SUL PANARO

RIVARA

co. s. a. n. c. e. t. a.

Illegible text

Medulla



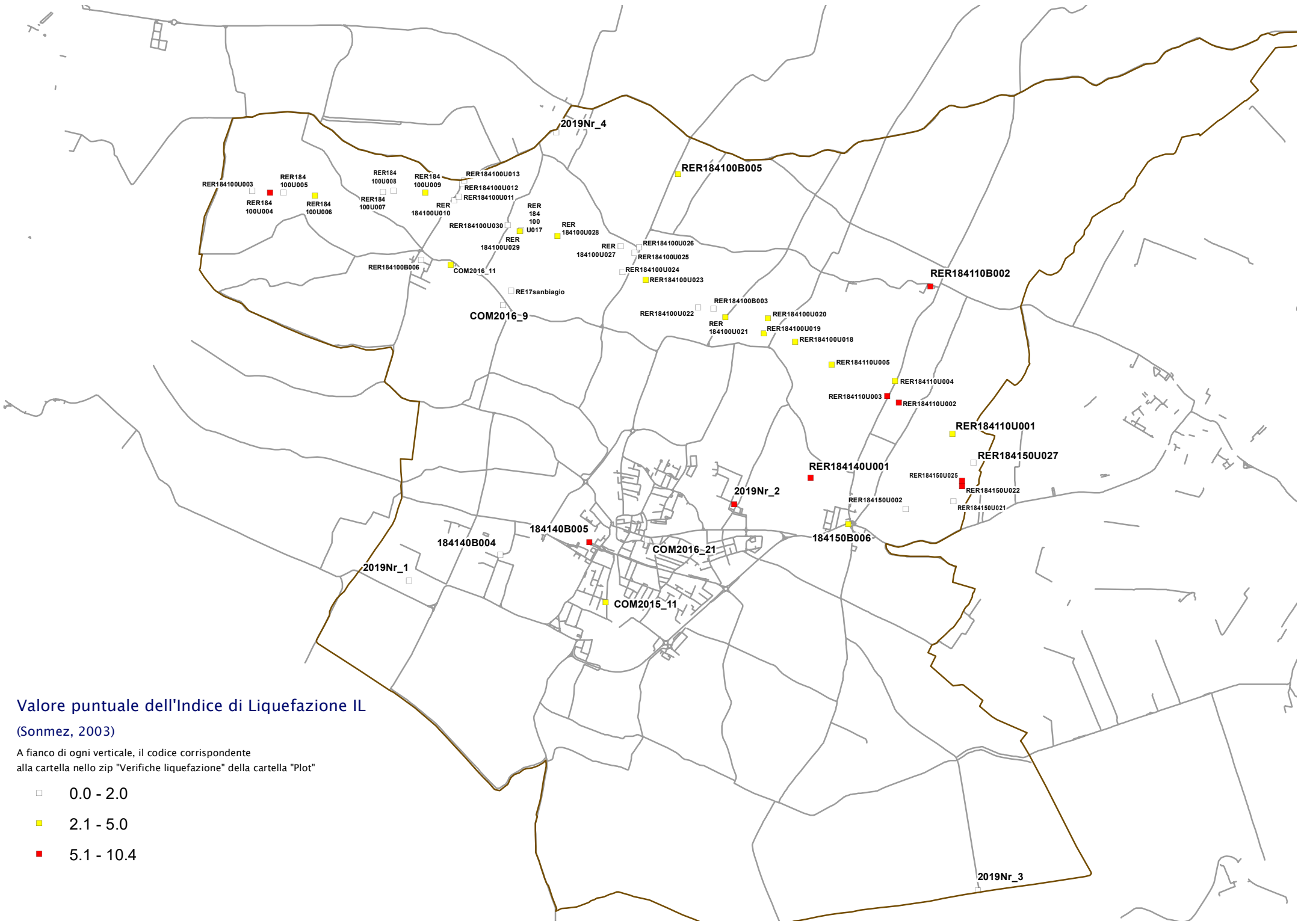
Alce Baraldi

Correggio

24

ALLEGATO 2

Carta dei punti di verifica per l'Indice di Potenziale Liquefazione: i codici si riferiscono alle cartelle all'interno dello zip "Verifiche_liquefazione", nella cartella "Plot\MS" di microzonazione sismica



Valore puntuale dell'Indice di Liquefazione IL

(Sonmez, 2003)

A fianco di ogni verticale, il codice corrispondente alla cartella nello zip "Verifiche liquefazione" della cartella "Plot"

- 0.0 - 2.0
- 2.1 - 5.0
- 5.1 - 10.4